

ESTUDO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO BIOLÓGICO ANAERÓBIO COMO ALTERNATIVA PARA TRATAMENTO DE CONDENSADO DE UNIDADE PRODUTIVA DE SULFATO DE AMÔNIO

Lorena Contreiras Viana¹

Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato²

Resumo

O presente trabalho teve como objetivos estudar os tratamentos anaeróbios existentes e selecionar o que melhor se aplica ao efluente condensado de uma planta de sulfato de amônio. A seleção se deu através de levantamento bibliográfico sobre as tecnologias disponíveis e comparativo entre as tecnologias para determinar a que melhor atendeu aos padrões de disposição exigidos por lei. Com a comparação feita por atribuição de pesos e notas aos critérios mais críticos e observou-se que a tecnologia AnMBR foi a que apresentou melhor desempenho qualitativo. Apesar de ser adequada para o tratamento do efluente em questão cuja DQO média é de 50.000 mg/L, o reator AnMBR não é suficiente para atender ao critério de DQO máximo para a disposição do efluente, o que indica que esta tecnologia deva ter uma fase de polimento ou ser associada a estação de tratamento já existente.

Palavras-chaves: Tratamento anaeróbio de efluentes; Tratamento de efluente industrial; Tecnologia de tratamento anaeróbio de efluentes.

Abstract

The objectives of this paper were to study the existing anaerobic treatment and determine which one is the best to be applied to an ammonium sulfate plant's condensate effluent. The selection was based on the bibliographic research about the existent technologies and the comparison of them to determine which one attended better the disposal criteria law. With the comparison, made by the attribution of weights and scores for the critical criteria, was concluded that the AnMBR was the technology with the best qualitative performance. Although it is an adequate technology for the effluent which the average COD is 50.000 mg/L, the AnMBR reactor doesn't satisfy the maximum COD criteria of disposal, indicating that is necessary a polishing process or the association with the existent effluent treatment station.

Keywords: Anaerobic wastewater treatment; Industrial wastewater treatment; Anaerobic wastewater treatment technologies.

1 INTRODUÇÃO

Com um modelo de gestão integrada, que busca associar os processos de qualidade, segurança, saúde ocupacional, responsabilidade social e meio ambiente, o grupo Unigel busca sempre minimizar a formação de resíduos em suas unidades.

Devido a essa política, são constantes os investimentos e estudos em novos processos que integrem uma unidade produtiva à outra, transformando o rejeito de uma em matéria prima para outra, agregando valor de mercado ao que antes era resíduo.

A corrente denominada de condensado da planta de sulfato de amônio é oriunda de um processo de cristalização e é rica em água. Parte deste condensado é reutilizado dentro do

¹Universidade Salvador (UNIFACS). E-mail: lorena.contreiras@outlook.com

²Docente em Engenharia Química na Universidade Salvador (UNIFACS). E-mail: ana.lobato@pro.unifacs.br

mesmo processo, entretanto, para atender ao princípio de conservação das massas, faz-se necessário o descarte de parte deste condensado.

Por ainda não ter identificado uma tecnologia eficiente e economicamente viável, a disposição atual é feita por terceiro. Buscando atender ao modelo de gestão, a Unigel investiga formas de tratar esta carga orgânica.

Este trabalho explora o tratamento anaeróbio como uma alternativa, uma vez que é uma tecnologia em expansão, com resultados positivos conhecidos em tratamento de efluentes industriais diversos e conta com a produção de biogás (gás rico em metano), um aspecto positivo a seu favor, uma vez que esse gás pode ser usado como combustível.

Os objetivos deste trabalho foram realizar uma revisão bibliográfica sobre as principais tecnologias de tratamento anaeróbio para efluentes industriais e indicar a que melhor se adequa tecnicamente para tratar o efluente em questão através de um comparativo qualitativo entre as tecnologias estudadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de produção de sulfato de amônio

O sulfato de amônio é produzido através do processo combinando reação-*evaporação*, no qual amônia (NH₃) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) reagem, exotermicamente, conforme a reação representada abaixo:



Este composto pode ser obtido tanto pela via sintética assim como a partir de correntes de outros processos produtivos, tornando-o então coproduto de várias indústrias.

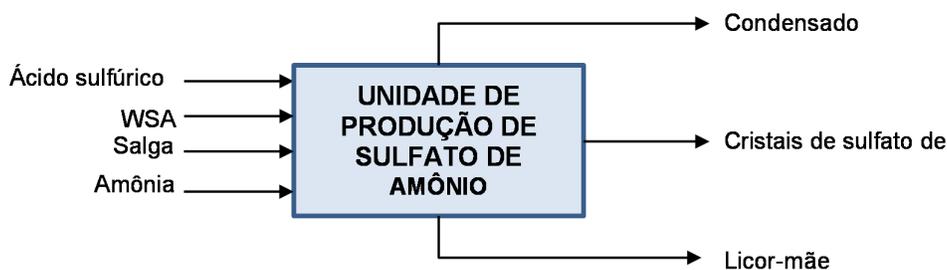
A indústria química (principalmente a de ácido cianídrico, caprolactama, acrilonitrila, cianeto de sódio, metil metacrilato, etc.) e indústria metalúrgica são exemplos que apresentam subprodutos que contêm amônia ou ácido sulfúrico e que geralmente são convertidos em sulfato de amônio para uso na agricultura. (HOFMANN et al., 2009).

Na unidade produtiva da Proquigel Química S.A. (Unigel) com a capacidade de produção de 900 toneladas por dia, o sulfato de amônio pode ser produzido tanto da forma sintética, através da reação de amônia com ácido sulfúrico a 98%, como a partir de uma mistura destes com as correntes de sulfato de amônio residual e de ácido sulfúrico residual,

denominadas de salga e *waste sulfuric acid* (WSA), subprodutos das unidades de ácido cianídrico (HCN) e metacrilato de metila (MMA) respectivamente (BRITO, 2015).

Esses subprodutos das unidades de MMA e HCN são as matérias primas usuais da unidade de fertilizante da Proquigel Química S.A., que produz o sulfato de amônio através da reação e da concentração das correntes de entrada, evaporando água e assim obtendo os cristais de sulfato e dois efluentes, o licor-mãe, rico em frações pesadas, e o condensado de processo, rico em frações leves, conforme a Figura 1:

Figura 1 – Diagrama de produção de sulfato de amônio



Fonte: Elaboração própria

2.2 Efluentes líquidos da indústria química

Os efluentes líquidos das indústrias químicas e petroquímicas são um tipo de perda de material de processo, componentes que apesar de fazerem parte do processo não foram agregados ao produto final ou convertidos em produtos secundários, e que por razões técnico-econômicas não podem ser aproveitados (CUNHA; MUSTAFA, 2015). Este tipo de efluentes pode ser classificado como: não contaminados ou orgânicos. Os efluentes não contaminados são aqueles resultantes de correntes com características inorgânicas, a exemplo das purgas de torres de resfriamento e de geração de vapor. Os efluentes líquidos orgânicos caracterizam-se por conterem compostos orgânicos provenientes do processo produtivo. (MUSTAFA, 1998).

Efluentes industriais em condições extremas provavelmente ocorrerão com maior frequência no futuro uma vez que os processos industriais otimizados e, por consequência, mais limpos requererão redução do consumo, reuso e recuperação dos recursos hídricos. (DERELI et al., 2012).

No processo produtivo de sulfato de amônio da Proquigel Química S.A. há a geração de dois efluentes líquidos: o licor-mãe e o condensado.

O licor-mãe tem comprovada eficiência agronômica e pode ser utilizado como fertilizante líquido regulado pelo Ministério da Agricultura (MAPA).

Já o condensado, é rico em compostos orgânicos e apresenta uma demanda química de oxigênio (DQO) que varia de 40.000 a 60.000 mg/L e uma geração média de 8.000 toneladas mensais. Este efluente requer tratamento para redução da carga orgânica para a reutilização ou que seja disposto na natureza dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais.

Apesar de possuir uma estação de tratamento de efluente (ETE) via lodo ativado, esta ETE não é capaz de tratar o condensado em sua totalidade devido à alta carga de matéria orgânica, absorvendo apenas 10% da corrente gerada (carga máxima de DQO admitida é de 1.400 mg/L DQO). Os outros 90% são enviados à CETREL, empresa contratada especializada em tratamento de efluentes líquidos, o que gera despesas à empresa sem nenhum retorno financeiro.

2.3 Tratamento anaeróbio de efluentes

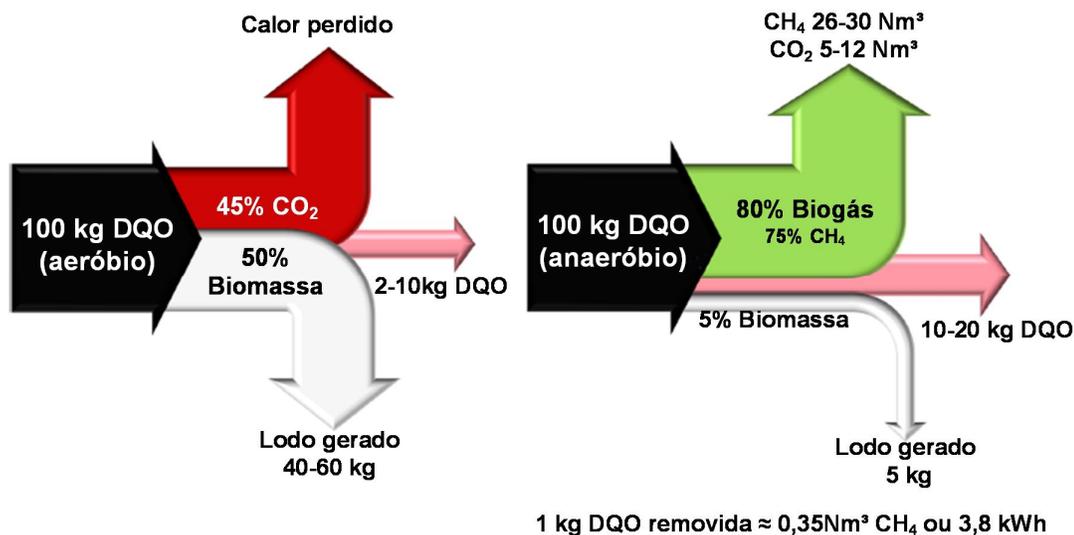
A rápida industrialização resultou na geração de uma grande quantidade de efluentes com elevado conteúdo orgânico que, se tratado adequadamente, pode resultar em uma fonte de energia. Apesar de haver impactos ambientais negativos associados à industrialização, este efeito pode ser minimizado e a energia pode ser aproveitada por meio de digestão anaeróbia de efluentes, o que atende também o interesse crescente em fontes alternativas de energia, resultado do aumento da demanda por energia associado ao aumento dos preços dos combustíveis disponíveis. (RAJESHWARI et al., 2000).

O tratamento biológico de efluentes é uma alternativa aos já conhecidos tratamentos físico-químicos. Neste tipo de tratamento os compostos orgânicos são oxidados por micro-organismos e pode ser aeróbio, quando há presença de oxigênio no meio de decomposição dos compostos orgânicos em inorgânicos sem a recuperação energética, ou anaeróbio, quando o oxigênio está ausente no meio reacional, acontecendo então a decomposição da matéria orgânica e a produção de biogás, que é uma mistura de basicamente dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), pelas bactérias. O biogás pode ser usado para gerar, tanto energia elétrica como energia térmica.

A Figura 2 apresenta, de forma generalizada, um comparativo entre as tecnologias aeróbia e anaeróbia, no qual pode se observar que os benefícios da segunda quanto a

recuperação energética e redução de formação de lodo são comprovados, e por isso foi escolhida para este estudo.

Figura 2 – Comparativo tratamento aeróbio *versus* anaeróbio



Fonte: Adaptado de Pereboom (2013).

Por se tratar de sistemas dependentes de seres vivos, a abordagem empírica é a mais aplicada pelos pesquisadores de reatores anaeróbios, tanto em nível de bancada ou piloto. Isso se deve à complexidade desse tipo de sistema com grande dependência de fatores químicos, físico-químicos e biológicos, a exemplo do tempo de retenção hidráulica, da velocidade de escoamento de líquido e do desenvolvimento microbiano. (ZAIAT, 2003).

O desenvolvimento quase que exclusivamente experimental também proporcionou diversos insucessos e ceticismo quanto à eficácia deste método de tratamento de efluentes. Entretanto, o desenvolvimento empírico, aliado aos conhecimentos técnicos e teóricos, como também o desenvolvimento de modelos particulares quanto aos tipos de reatores, micro-organismos e características do efluente, possibilitou um avanço na tecnologia anaeróbia, assim como sua maior aceitação no mercado, passando então a ser considerado como uma alternativa para o tratamento de efluentes industriais. (ZAIAT, 2003).

A maior aceitabilidade desta tecnologia permitiu a continuidade dos estudos de desenvolvimento de reatores e metodologias atendendo às particularidades dos mais diversos tipos de resíduos orgânicos. Reatores de fluxo ascendente, de circulação interna, associados às membranas, dentre outros, representam o estado da arte do tratamento anaeróbio, que teve como precursor o filtro anaeróbio, um filtro no qual juntamente ao elemento filtrante

encontravam-se os micro-organismos, aderidos a um suporte, responsáveis pela decomposição dos resíduos. (WANG et al., 2009).

Na Tabela 1, pode-se observar algumas vantagens e desvantagens típicas de sistemas anaeróbios.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixa produção de sólidos, cerca de 10 vezes inferior aos processos aeróbios • Baixo consumo de energia • Baixos custos operacionais • Baixa área demandada • Baixos custos de implantação • Produção de biogás, rico em metano que tem alto poder calorífico • Possibilidade de preservação de biomassa • Tolerância a elevadas cargas orgânicas • Aplicabilidade em pequenas e grandes escalas • Baixo consumo de nutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Bactérias suscetíveis à inibição por alguns compostos • Lenta partida do processo na ausência de inóculo • É necessário pós-tratamento • A bioquímica e microbiologia da digestão anaerobia são complexas • Geração de efluente com aspecto desagradável • Remoção de N, P e patógenos é insatisfatória

Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

Como um processo comercial, o tratamento anaeróbio de efluentes evoluiu para uma tecnologia de tratamento competitiva nas últimas décadas, principalmente do fim dos anos 1960 até hoje. Uma variedade grande de efluentes orgânicos, inclusive aqueles que antes não se acreditava ser possível tratar anaerobicamente, agora são tratados utilizando os processos chamados de alta eficiência. (VAN LIER, 2008).

Nos últimos anos, uma atenção considerável tem sido dada para o desenvolvimento de reatores para tratamento anaeróbio de resíduos conhecidos como reatores de segunda geração, digestores de taxa elevada ou ainda digestores de alta eficiência, que podem lidar com os resíduos em uma alta carga orgânica de uma média de 24 kgDQO/m³ por dia e alta velocidade de fluxo ascendente (entre 2 e 3 m/h em alguns tipos de reatores) e possuem um baixo tempo de retenção hidráulica. No entanto, as eficiências de tratamento destes reatores são sensíveis a parâmetros tais como a composição das águas residuais, especialmente a concentração de vários íons e a presença de compostos tóxicos, tais como fenol. A temperatura e o pH são

conhecidos por afetar também o desempenho do reator ao afetar o grau de acidificação do efluente e a formação de produto. (RAJESHWARI et al., 2000).

Van Lier (2008) cita como as principais vantagens do tratamento anaeróbio de alta taxa sobre o convencional:

- a) quantidade do excesso de lodo produzido até 90% menor;
- b) espaço ao usar sistemas de leito de lodo expandidas (EGSB) é até 90% menor;
- c) admite altas taxas orgânicas na alimentação atingindo DQO de 20-35 kg DQO/m³/dia, implicando em volumes menores dos reatores;
- d) não utiliza combustíveis fósseis no tratamento, economizando cerca de 1kWh/kg DQO removida;
- e) período de *start-up* curto (uma semana) se utilizado inoculo granular;
- f) nenhum ou muito pouco consumo de produtos químicos;
- g) lodo pode ficar inativo (sem alimentação) o que permite operações sazonais;
- h) lodo excedente tem valor de mercado (biofertilizante);
- i) aplicável em pequenas e grandes escalas;
- j) tecnologias de alta eficiência facilitam o reuso de água, aspecto positivo na busca pelo efluente zero.

Estas vantagens consolidaram os reatores anaeróbios de alta taxa como boas alternativas para tratamento de efluentes e os impulsionaram para o mercado de tratamento de efluentes.

Os reatores podem ser divididos, de forma geral, entre os três mecanismos mais usuais para reter a biomassa, que são: decantação/sedimentação, adesão a um suporte e granulação. Este último é o mais aplicado devido à abundância de reatores de fluxo ascendente e manta de lodo anaeróbico (*upflow anaerobic sludge bed* - UASB), de leito de lodo expandido (*expanded granular sludge bed* - EGSB) e circulação interna (*internal circulation* - IC) nos tratamentos de efluentes industriais. (DERELI et al., 2012).

A granulação, que é definida como a formação de agregados de micro-organismos com funcionalidades variadas, depende de diversos aspectos, como condições hidráulicas, características do efluente, parâmetros físico-químicos, dentre outros. Mecanismos de seleção bacteriana pode representar uma alternativa para uma granulação bem-sucedida. De forma geral, um tempo de retenção hidráulica inferior a dois dias é um indicativo de uma boa granulação. Embora seja uma tecnologia viável para tratar uma vasta gama de efluentes,

existem algumas limitações, como o problema de arraste hidráulico da biomassa. (DERELI et al., 2012).

Para superar a deficiência dos reatores de lodo granular, surge o mais recente avanço nos tratamentos anaeróbios de alta eficiência, que usa membranas para separar a biomassa do efluente. Biorreatores anaeróbios de membrana (*anaerobic membrane bioreactors* - AnMBRs) oferecem alta qualidade na corrente de saída do tratamento, livre de sólidos e patógenos devido à sua maior eficiência de tratamento e completa retenção da biomassa independente da sua capacidade de decantação ou de granulação. (DERELI et al., 2012).

A seguir são apresentados os reatores UASB, EGSB, IC e AnMBR.

Reator UASB – Considerado o precursor do tratamento anaeróbio de alta taxa, o reator de fluxo ascendente e manta de lodo anaeróbio é uma tecnologia comum, simples, compacta e de baixo custo utilizado extensivamente para o tratamento de efluentes.

A estrutura principal do reator é um leito de lodo denso localizada na parte inferior, o que garante um bom contato das águas residuais com a biomassa. Entre as vantagens notáveis, UASB requer menos volume do reator e no espaço ocupado, apresenta maior produção de biogás e velocidade de fluxo quando comparado aos reatores anaeróbios convencionais. (MAO et al., 2015).

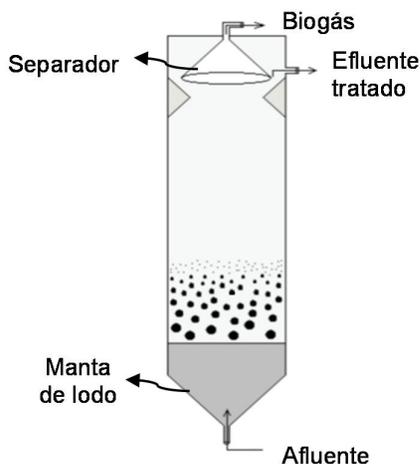
O avanço proporcionado pelo reator de manta de lodo está associado, principalmente, à grande retenção da biomassa sem a necessidade de material suporte, como ocorria nos filtros biológicos (HABEEB et al., 2011). Para reter o conglomerado microbiano no reator, os reatores UASB usam grânulos densos de bactérias, que servem como um filtro para impedir a lavagem bacteriana e que também proporcionam uma maior área de superfície para um desenvolvimento mais rápido e melhorado da biomassa (MAO et al., 2015). Dessa forma, o volume do reator passou a ser mais bem aproveitado, devido ao aumento de seu volume útil, resultando em unidades mais compactas, com alto tempo de retenção celular e alta concentração de biomassa.

Portanto, o desempenho do UASB é, em grande parte, dependente da qualidade dos grânulos da sua manta de lodo. Além disso, quando há alteração do tipo de resíduos, os grânulos de lodo, geralmente, não mantem as características, com algumas exceções. Como consequência, o desafio para esta tecnologia é que determinados resíduos podem desenvolver uma manta granular rapidamente, ao passo que outros resíduos podem ter o desenvolvimento mais lento. Além disso, um longo período de partida e significativa perda de biomassa por

arraste hidráulico (lavagem de biomassa) durante a fase inicial do processo são tipicamente necessários, e o reator requer operação especializada. (MAO et al, 2015).

Mecanicamente, é um biodigestor que consiste basicamente de um tanque, no qual o resíduo líquido a ser tratado (chamado a partir deste ponto de afluente) é distribuído, uniformemente, no fundo do reator e passa através de uma camada biológica de lodo, o biodigestor propriamente dito, que transforma o material orgânico em biogás. Na parte superior, existe um separador de fases gás-líquido-sólido que garante a segregação dos componentes da solução onde a fração líquida é o efluente tratado, as partículas sólidas, em sua maior parte biomassa, são retidas e descem por gravidade, e o gás é coletado no topo do reator na forma de biogás, conforme a Figura 3. (HABEEB et al., 2011).

Figura 3 – Desenho esquemático de reator UASB



Fonte: Adaptado de Habeeb et al. (2011)

Os reatores UASB são sistemas compactos e de alta taxa de digestão, indicados para a recuperação eficiente do gás metano. Estes reatores se baseiam no princípio de separação das fases sólida, líquida e gasosa, fazendo com que o lodo acumule e se mantenha no tanque de tratamento.

O bom funcionamento do reator depende do bom contato entre o afluente e a densa manta de lodo no fundo do reator, onde todas as reações acontecem. Esta manta é basicamente formada pelo acúmulo dos sólidos suspensos que adentram o reator e pelo crescimento bacteriano. Neste tipo de reator, sob determinadas condições, observou-se que as bactérias se agregavam em flocos e grânulos espontaneamente. Estes agregados decantam facilmente e tem pouca tendência a sofrerem lavagem de biomassa se operado corretamente. A renteção do

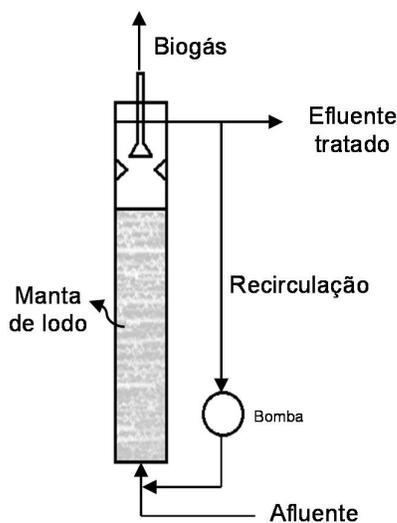
lodo, tanto granular como floculado, no reator UASB permite uma boa performance com altas cargas orgânicas. A turbulência ocasionada tanto pela vazão do afluente como pelo biogás fornece um bom contato entre o afluente e a biomassa. (SEGHEZZO et al., 1998).

Reator EGSB – É definido como uma modificação do o reator UASB e é geralmente usado quando a taxa volumétrica de produção de gás é baixa e a agitação interna apenas com a velocidade da corrente de afluente é insuficiente. Como um derivado do UASB, o EGSB responde às necessidades das pequenas e médias indústrias de tratamento de águas residuais complexos e/ou de baixa carga de DQO. (MAO et al., 2015).

Seu desenvolvimento se deu a partir de estudos que comprovaram que a agitação interna em reatores UASB não era suficiente em determinados casos, o que provocava uma zona morta no reator e prejudicava o tratamento. Com o intuito de melhorar o contato da biomassa com o afluente e usar todo o volume do reator de forma eficiente propôs-se uma melhor distribuição da alimentação do líquido. Mudança nos tipos e número de dispositivos de alimentação por metro quadrado e maior velocidade superficial foram recomendados. A recirculação do efluente combinada com reatores mais altos (ou com maior razão altura/diâmetro) resultou no que passou a ser chamado de EGSB. (SEGHEZZO et al., 1998).

Nos reatores EGSB, representado esquematicamente na Figura 4, a biomassa está na forma granular, mas as condições de fluxo de líquido são mais altas que nos reatores UASB.

Figura 4 - Desenho esquemático do reator EGSB



Fonte: Adaptado de Seghezzo et al. (1998).

O reator EGSB apresenta várias vantagens sobre o UASB: o EGSB demanda um espaço menor, oferece maior mistura devido às maiores velocidades de fluxo ascendente e, conseqüentemente, melhora a transferência de massa, a atividade da biomassa e o transporte dos conglomerados de lodo; o EGSB é capaz de tratar efluentes que contêm lipídios e compostos tóxicos ou inibitórios; o EGSB é mais apropriado para tratamentos de contaminantes solúveis (MAO et al., 2015).

O EGSB se diferencia do UASB na velocidade superficial ligeiramente superior do líquido (5 a 10 m/h em comparação com a 3 m/h para as águas residuais solúveis e 1 a 1,25 m/h para as águas residuais parcialmente solúvel num UASB) (LETTINGA, 1995 apud RAJESHWARI et al., 2000). Devido às velocidades mais elevadas de fluxo ascendente, uma parte significativa do leito de lodo granular desenvolverá um estado fluidizado nas regiões superiores do leito. Por consequência, o contato entre o efluente e biomassa é excelente. A taxa de carga máxima alcançável em EGSB é ligeiramente maior do que a de um sistema UASB (RAJESHWARI et al., 2000). Os reatores EGSB admitem maior carga orgânica (até 40 kg DQO/m³/dia) se comparado com o UASB e tem melhor desempenho em caso de afluentes muito diluídos (neste caso a recirculação não se aplica); o lodo é sempre granular, bastante ativo, e a sedimentabilidade é boa além do padrão de mistura ser diferente do UASB devido velocidade ascensional ser mais alta e a maior produção de biogás, maximizando o contato de lodo com o afluente. Aspectos negativos da tecnologia é que o lodo floculado é lavado hidrodinamicamente e a remoção de sólidos suspensos e coloides não é satisfatória. (SEGHEZZO et al., 1998).

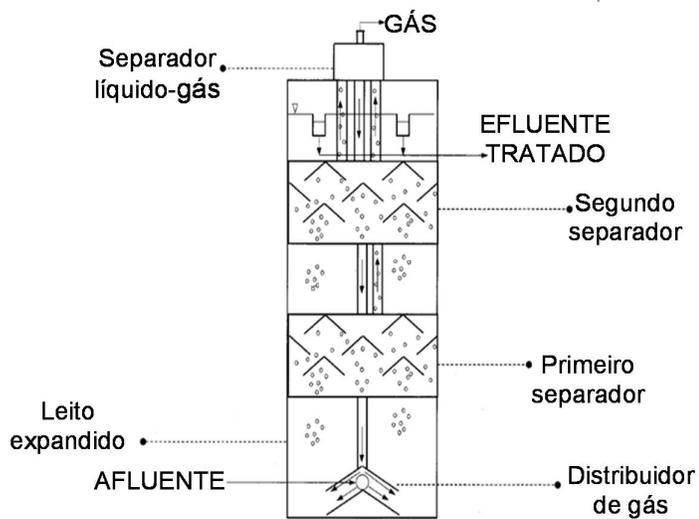
Essas características e diferenças permitiram que vários tipos de águas residuais que não podiam ser tratadas usando os sistemas convencionais UASB passassem a ser. São exemplos águas residuárias que contêm componentes altamente tóxicos, mas ainda assim são degradáveis por via anaeróbia, mas que o tratamento requer diluição externa ou interna para manter a concentração de substâncias tóxicas baixa o suficiente para não inibir a atividade da biomassa, águas residuais contendo corantes e outros aditivos para tecidos que passaram a ser convertidos com êxito, em biogás sem efeitos inibitórios sobre a biomassa, e águas residuais em baixas temperaturas e baixa concentração de DQO, o que implica na produção de gás muito baixa e insuficiente para provocar turbulência. (VAN LIER et al., 2015).

Reator IC – O reator IC consiste em dois reatores tipo UASB um em cima do outro, trabalhando em série. Assim, um reator IC tem dois conjuntos de separação de 3 fases. Devido a essa particularidade, o reator IC pode separar o gás, o líquido e os sólidos e

simultaneamente, melhorar a retenção de biomassa, o que permite uma maior atividade da mesma e melhora na qualidade do efluente final. A separação de biogás em duas fases diferentes e a circulação interna de efluentes são as características especiais deste reator. (MAO et al., 2015).

O reator IC, representado na Figura 5, é um tanque vertical de altura e largura variáveis. Seu funcionamento se dá pelo bombeamento do afluente pelo o fundo do reator que, através de um sistema de distribuição eficiente, é misturado com a biomassa anaeróbia granular. (NICOLELLA et al., 2000).

Figura 5 - Desenho esquemático do reator IC



Fonte: Adaptado de Nicolella et al. (2000).

O primeiro compartimento contém um leito de lodo granular expandido, onde a maior parte da DQO é convertida em biogás. Este gás é recolhido no separador de fases do nível inferior. Isto gera uma "elevação a gás", que força a mistura água e lodo para cima através do tubo ascendente para dentro do separador líquido-gás no topo do reator. O biogás deixa o reator através deste separador, e parte da solução de líquido e biomassa retorna para a parte inferior do sistema: daí o nome, circulação interna. Na parte inferior, a velocidade do líquido ascendente varia de 10 a 20 m/h. (NICOLELLA et al., 2000).

O efluente do primeiro compartimento é pós-tratado no segundo compartimento, onde a DQO remanescente é removida. Há um segundo separador de fases que funciona exatamente como o primeiro. A velocidade do líquido neste compartimento normalmente varia entre 2 e 10 m/h. (NICOLELLA et al., 2000).

Com base na sua circulação interna, este tipo de reator admite uma concentração orgânica de entrada muito maior, (com uma DQO de 35 kg DQO/m³/dia sendo a mais alta alcançada). Além disso, em comparação com os reatores UASB e EGSB, o sistema IC pode tratar águas residuais de baixa carga orgânica em maior tempo de retenção hidráulica por causa do fluxo ascendente dos líquidos e das velocidades gás. Este digestor, em condições hidrodinâmicas ideais, demonstrou boa capacidade de degradação e capacidade de resistir a várias cargas de choque. O reator IC tem sido aplicado com sucesso em diferentes indústrias, como a cervejaria e indústria de bebidas, indústria de papel e celulose, destilaria e indústria de fermentação, e indústrias químicas e petroquímicas. (MAO et al., 2015).

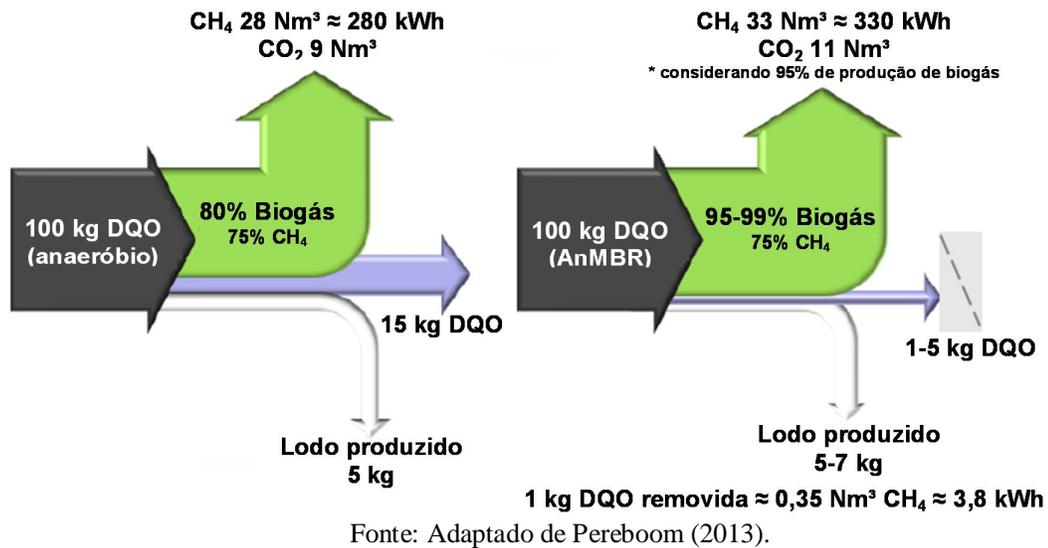
Reator AnMBR – Nos últimos anos, com a crescente experiência de aplicação de biorreatores aeróbios com membrana (MBRs), a versão anaeróbia (AnMBRs) têm recebido muita atenção, especialmente para aquelas aplicações onde os sistemas de leito de lodo comumente aplicadas são menos bem-sucedida. AnMBRs combinam as vantagens de ambos MBR e tecnologia anaeróbia. (VAN LIER et al., 2015).

AnMBRs oferecem alta qualidade ao efluente deixando-o livre de sólidos e patógenos devido à sua maior eficiência de tratamento e completa retenção da biomassa, independentemente da sua capacidade de decantação ou de granulação. (DERELI et al., 2012). Além disso, essa capacidade de retenção pode ser utilizada para manter as comunidades microbianas especiais que podem degradar determinados poluentes. (VAN LIER et al., 2015).

Esta retenção da biomassa é uma remediação ao problema de lavagem de biomassa. Logo, esta tecnologia pode apresentar uma opção atraente para tratamento de águas residuais industriais em condições extremas tais como alta salinidade, temperatura elevada, altas concentrações de sólidos suspensos e presença de toxicidade, que dificultam a granulação e retenção de biomassa ou reduzem a atividade biológica. (VAN LIER et al., 2015).

Há indícios de que a conversão de DQO em metano nos reatores AnMBRs é maior que em reatores UASB (FUTSELAAR et al., 2013). A Figura 6 faz o comparativo genérico entre reatores de leito granular e o AnMBR e indica que a conversão em biogás é realmente superior e, por consequência, a DQO do efluente é ainda menor.

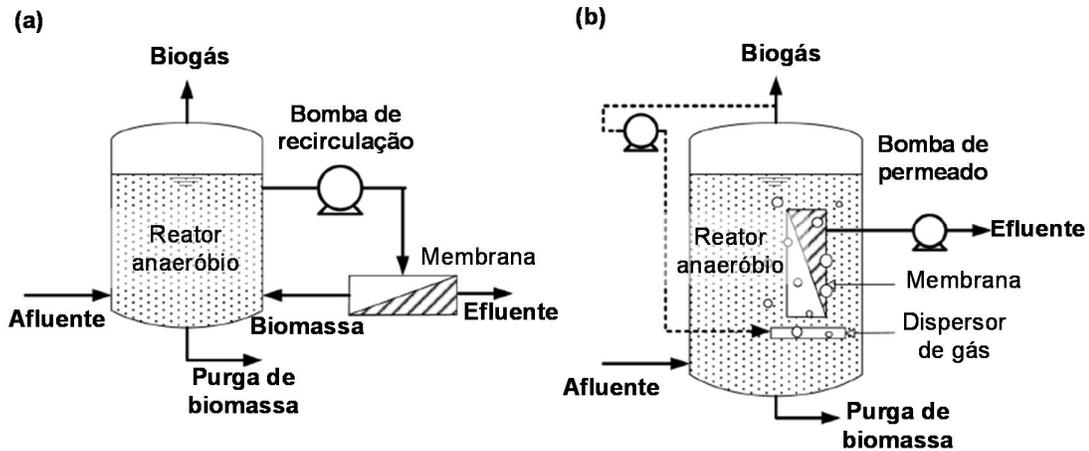
Figura 6 - Comparativo reatores anaeróbios de leito granular *versus* AnMBR



As forças de cisalhamento decorrente do processo de filtração minimizam o tamanho das partículas dos conglomerados de bactérias e, portanto, neste tipo de reator não é esperada a granulação do lodo. Os sistemas AnMBR mais pesquisadas consistem de um biorreator tipo mistura perfeita (*completely stirred tank reactor* – CSTR) acoplado a um sistema de membranas em fluxo cruzado ou um biorreator CSTR com módulos de membranas submersas. (VAN LIER et al., 2015).

A Figura 7 apresenta os arranjos entre reator e membrana. A grande maioria dos reatores instalados utiliza membranas imersas, devido ao baixo consumo energético requerido por esse arranjo. Quanto à vida útil, as membranas submersas têm uma vida maior que as não imersas, uma vez que a frequência de limpeza química é muito pequena quando comparada com as outras membranas, que fazem retrolavagem a cada 20 min e limpeza química a cada 100 ciclos aproximadamente, ao passo que as submersas operam meses sem limpeza química. (PEREBOOM, 2013).

Figura 7 - AnMBR com módulo de membranas externo e fluxo cruzado (a); e com módulo de membranas interno (b)



Fonte: Adaptado de Visvanathan e Abeynayaka (2012).

Embora os AnMBRs ofereçam muitas vantagens, o entupimento das membranas é o um dos principais gargalos para a sua aplicação. Incrustações nas membranas reduzem o fluxo devido ao acúmulo de partículas orgânicas e inorgânicas sobre os poros da membrana ou em sua superfície. Entupimento das membranas é um processo de múltiplas variáveis que é afetado pelas características do efluente, da operação do reator, das características da membrana e das propriedades da biomassa. A formação de uma camada (torta) foi identificada como o mais importante mecanismo de incrustação em AnMBRs. Embora, em longo prazo, o entupimento da membrana seja inevitável, os atuais estudos têm focado na forma de reduzir o acúmulo com o tempo através de procedimentos operacionais e de controle mais eficientes. (DERELI et al., 2012).

Os custos operacionais relacionados com as necessidades energéticas para recirculação do gás/líquido para controlar incrustação na membrana e custos com produtos químicos para limpeza das membranas ainda pesam negativamente sobre a viabilidade econômica da tecnologia. Entretanto, as despesas com manutenção das membranas diminuíram significativamente devido a um declínio nos custos de módulos de membrana. (VAN LIER et al., 2015).

3 OBJETIVOS

O presente projeto tem como objetivos propor tecnologia de tratamento biológico que melhor se adeque ao efluente e atenda às demandas de descarte exigidas por lei, através de coleta de dados do efluente e estudo dos processos de tratamento biológico anaeróbio levantando os processos que melhor se adequem às condições do efluente e, então, propor o melhor tipo de tratamento.

4 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido por meio do estudo do processo de produção de sulfato de amônio e da caracterização do efluente a ser tratado conforme dados obtidos por Brito (2015), que em seu trabalho estuda alternativas de tratamento químico para o condensado como a eletrofloculação, *stripping* com ar e ozonização.

A metodologia adotada consistiu de levantamento bibliográfico de tecnologias comerciais de tratamento anaeróbio com o objetivo de embasar a seleção da tecnologia que melhor se adequa ao tratamento do efluente condensado da planta de sulfato de amônio da Proquigel. O processo de avaliação e conseqüentemente da seleção se deu pela determinação de critérios qualitativos e atribuição de pesos a eles em uma escala cardinal crescente de 0 a 60, sendo 0 o de menor relevância e 60 o de maior relevância, uma adaptação à metodologia utilizada por Kalbar et al. (2012).

Os critérios qualitativos avaliados foram definidos para atender as demandas da lei de disposição de efluentes assim como as condições requeridas por cada um dos sistemas para operarem e eles são:

a) Eficiência de redução de DQO – a DQO é o aspecto mais crítico do efluente uma vez que é cerca de 420 vezes maior que o padrão de descarte e a alta eficiência de redução desta característica é crucial para a aplicação do tratamento;

b) Capacidade de admissível de DQO – uma maior capacidade de admitir carga de DQO reduz a necessidade de diluição, etapas intermediárias e armazenamento de efluente contribuindo positivamente na avaliação da tecnologia;

c) Independência de lodo granular – a granulação do lodo depende da característica do efluente a ser tratado e pode não acontecer, inviabilizando o tratamento de tecnologias dependentes de lodo granular

- d) Volume do reator – quanto maior o volume do reator maior o investimento;
- e) Área requerida – a retirada área útil que poderia ser destinada a uma unidade produtiva é um aspecto economicamente negativo;
- f) Manutenção – deve ser de fácil manutenção para diminuir gastos com mão de obra e evitar paradas desnecessárias;
- g) Operabilidade – deve ser de fácil operação manutenção para diminuir gastos com mão de obra e evitar paradas desnecessárias.

O peso atribuído a cada um dos critérios foi definido conforme a priorização, a importância ou o impacto que cada um tem perante o tratamento do efluente abordado.

Na etapa de avaliação, a cada uma das tecnologias foi atribuída uma nota de 1 a 4 de acordo com as informações colhidas na bibliografia conforme o desempenho de cada uma nos critérios avaliados sendo 1 um desempenho ruim, 2 um desempenho regular, 3 um desempenho bom e 4 com um desempenho muito bom ou excelente, podendo ocorrer notas iguais em caso de desempenho semelhante.

5 RESULTADOS

Inicialmente foram obtidos dados a respeito do condensado. As características do mesmo estão descritas na Tabela 2 e o padrão de descarte de efluentes líquidos exigido pelo INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos) é apresentado na Tabela 3.

Tabela 2 – Características do condensado de sulfato de amônio

Item	Valor	Unidade
Vazão normal	11.000	kg/h
DQO média	50.000	mg/L
DBO média	25.000	mg/L
Água	95	% massa
Cianeto	20	mg/L
Temperatura	60	°C
pH	4	-

Fonte: Brito (2015)

Tabela 3 – Padrão de lançamento exigido pelo INEMA

Item	Valor	Unidade
DBO	40	mg/L
DQO	120	mg/L
Cianeto	0,2	mg/L
pH	5 - 9	-

Fonte: Elaboração própria

Observou-se que o condensado de sulfato de amônio tem alta carga de matéria orgânica e conseqüentemente alta DQO, cerca de 420 vezes maior que o padrão de descarte, e portanto não pode ser disposto sem tratamento prévio. Um efluente com as características apresentadas é possível de ser tratado anaerobicamente e ainda tem a vantagem de não necessitar de diluição para alimentação no reator, uma vez que é rico em água.

Feita a revisão da bibliografia, caracterizado o condensado e conhecido o padrão de despejo exigido, determinou-se os critérios a serem considerados na avaliação de seleção. A Tabela 4 apresenta os critérios, os pesos e as notas atribuídas às tecnologias consideradas.

Tabela 4 – Critérios, pesos e notas para seleção da tecnologia mais apropriada

Critério	Peso	UASB	ESGB	IC	AnMBR
Eficiência de redução de DQO	60	2	3	3	4
Capacidade de admissível de DQO	50	1	2	2	2
Independência de lodo granular	40	1	1	1	4
Volume do reator	40	1	3	3	2
Área requerida	30	2	3	4	2
Manutenção	20	3	3	3	2
Operabilidade	10	3	3	3	2
TOTAL	-	440	680	710	800

Fonte: Elaboração própria.

A tecnologia UASB tem o pior desempenho dentre as quatro avaliadas com apenas 440 pontos. A eficiência de redução de DQO inferior às demais, menor capacidade de admitir DQO, dependência do lodo granular e o volume do reator e área requerida pelas instalações pesam negativamente para a tecnologia que foi a precursora dentre as de eficiência elevada.

A tecnologia EGSB tem o segundo pior desempenho dentre as quatro avaliadas com 680 pontos. A capacidade intermediária de admitir DQO e a dependência do lodo ser granular e contribuíram negativamente na avaliação. Apesar do desempenho negativo destaca-se o

volume do reator, a área requerida pelo mesmo a facilidade de manutenção e operabilidade são aspectos positivos desta tecnologia.

A tecnologia IC, com 710 pontos, tem o segundo melhor desempenho dentre as avaliadas. A capacidade intermediária de admitir DQO e, principalmente, a dependência do lodo ser granular contribuíram negativamente na avaliação. Apesar de não ter tido o melhor desempenho destacam-se o volume reduzido do reator, a área requerida pelo mesmo – a menor dentre todas as tecnologias -, a facilidade de manutenção e operabilidade como aspectos positivos desta tecnologia.

A tecnologia AnMBR, com 800 pontos, foi a melhor avaliada conforme os critérios propostos. A maior eficiência de redução de DQO e a independência do lodo ser granular foram os aspectos que contribuíram positivamente para a avaliação da tecnologia. Os demais aspectos tiveram avaliação intermediária para negativa. O destaque negativo vai para a dificuldade de manutenção e de operabilidade que são pontos críticos para o bom funcionamento da tecnologia e requerem alta técnica e operação especializada.

Para atingir o padrão de DQO exigido, seria necessária uma redução de 99,998%, o que demanda uma eficiência de tratamento muito elevada. Isso indica que apesar do alto desempenho dos reatores AnMBR na redução de DQO, que varia de 95% até 99% de eficiência, esta eficácia ainda não é suficiente para atingir o padrão exigido pelo INEMA pois o efluente ainda teria uma carga orgânica entre 400 a 2000 mg/L DQO. Para atingir o padrão de descarte exigido, que é de 120 mg/L DQO, uma redução de 99,998% seria necessária.

6 CONCLUSÕES

O estudo bibliográfico de tecnologias anaeróbias indicou quatro tecnologias de maior aplicação para tratamento de efluente industrial: UASB, EGSB, IC e AnMBR.

Após uma avaliação qualitativa que considerou critérios importantes, com ênfase principal na eficiência de redução de DQO, critério mais crítico do efluente e de valor muito acima ao exigido por lei, a tecnologia AnMBR foi a que teve melhor resultado.

Apesar do bom desempenho da tecnologia na avaliação, as informações do efluente apontam uma necessidade de remoção de 99,998% da DQO para atingir o padrão de descarte exigido por lei. Esta eficiência é um valor muito elevado o que aponta para usar a tecnologia anaeróbia como pré-tratamento do condensado e o mesmo seguir para um polimento ou até

mesmo ser encaminhado para a ETE já existente, uma vez que a carga orgânica atingida deve atender aos requisitos de alimentação da mesma que é de no máximo 1.400 mg/L de DQO.

REFERÊNCIAS

BRITO, Henrique Coimbra. **Tecnologias para pré-tratamento do condensado proveniente do processo de produção de sulfato de amônio para associação com a estação de tratamento biológico da empresa Proquigel Química S.A.** 2015. 23 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Salvador, Salvador, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: biodigestores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 1997. (v. 5)

CUNHA, José João Ramon Oliveira; MUSTAFA, George de Souza. Redução da emissão de efluentes líquidos e minimização do consumo de água em planta industrial pelo método do diagrama de fontes de água. In: SEMINÁRIO ESTUDANTIL DE PRODUÇÃO ACADÊMICA - SEPA, 14., 2015. Salvador. **Anais...** Salvador, 2015.

DERELI, R.K.; ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; OZTURK, I.; JEISON, D.; VAN DER ZEE, F.; VAN LIER, J.B. Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters. **Bioresource Technology**, v. 122, p.160-170, out. 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.139.

FUTSELAAR, Harry; ROSINK, Roy; SMITH, Geo; KOENS, Lars. The anaerobic MBR for sustainable industrial wastewater management. **Desalination and Water Treatment**, v. 51, p.1070-1078, 2013. DOI: 10.1080/19443994.2012.697348.

HABEEB, S. A.; LATIFF, A.; DAUD, Z.B.; AHMAD, Z.B. A review on granules initiation and development inside UASB Reactor and the main factors affecting granules formation process. **International Journal of Energy and Environment (IJEE)**, v. 2, n. 2, p.311-320, 2011.

HOFMANN, Gunther; PAROLI, Franco; VAN ESCH, Jan. Crystallization of ammonium sulphate: state of the art and new developments. **Chemical Engineering Transactions**, AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering, v. 17, p. 657-662, maio 2009. DOI: 10.3303/CET0917110.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision making. **Technology in Society**, v. 34, p. 295-302, 2012. DOI: 10.1016/j.techsoc.2012.10.001

MAO, Chunlan, FENG, Yongzhong; WANG, Xiaojiao; REN, Guangxin. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p.540-555, maio 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.032.

MUSTAFA, George de Souza. **Reutilização de Efluentes Líquidos em Indústria Petroquímica**. 115 f. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 1998.

NICOLELLA, C.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M.; HEIJNEN, J.J. Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. **Journal of Biotechnology**, v. 80, fev. 2000. DOI: 10.1002/chin.200036299.

PEREBOOM, Jan. **Nieuwe anaerobe technieken**, Meer biogas voor bedrijven tegen lagere kosten. Veolia, março 2013..

RAJESHWARI, K.V.; BALAKRISHNAN, M.; KANSAL, A.; LATA, K.; KISHORE, V.V.N. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, p.135-156, jun. 2000. DOI: 10.1016/s1364-0321(99)00014-3.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; VAN LIER, J.; HAMELERS, H.V.M.; LETTINGA, G. The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. **Bioresource Technology**, v. 65, n. 3, p.175-190, set. 1998. DOI: 10.1016/S0960-8524(98)00046-7.

VAN LIER, J. High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. **Water Science & Technology**, v. 57, n. 8, p. 1137-1148, abr. 2008. DOI: 10.2166/wst.2008.040.

VAN LIER, J.B.; VAN DER ZEE, F.P.; FRIJTERS, C.T.M.; ERSAHIN, M.E. Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, ago. 2015.. DOI: 10.1007/s11157-015-9375-5.

VISVANATHAN, Chettiyappan; ABEYNAYAKA, Amila. Developments and future potentials of anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs). **Membrane Water Treatment**, v. 3, n. 1, setembro 2012..

WANG, Lawrence K.; SHAMMAS, Nazik K.; HUNG, Yung-Tse (Ed.). **Handbook of Environmental Engineering: Advanced Biological Treatment Processes**. Lenox: Humana Press, 2009. 738 p. (v. 9).

ZAIAT, Marcelo. **Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias**. 2003. 135 f. Tese (Tese de Livre Docência) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.