



Aplicações da Biotecnologia em Processos Ambientais da
Fabricação de Celulose Kraft e de Papel de Eucalipto:
Tratamentos Anaeróbicos de Efluentes Industriais

Celso Foelkel

<http://www.celso-foelkel.com.br>

<http://www.eucalyptus.com.br>

<https://twitter.com/AVTCPEP>

<https://twitter.com/CFoelkel>

Novembro 2014



EUCALYPTUS ONLINE BOOK

CAPÍTULO 37

Aplicações da Biotecnologia em Processos Ambientais da
Fabricação de Celulose Kraft e de Papel de Eucalipto:
Tratamentos Anaeróbicos de Efluentes Industriais

Organizações facilitadoras:



[ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel](#)



[IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores](#)

indústria brasileira de árvores



[IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais](#)

Empresas e organizações patrocinadoras:



[Fibria](#)



[ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel](#)



[ArborGen Tecnologia Florestal](#)



[Ashland](#)



Celulose Irani S.A.

[Celulose Irani](#)



[CENIBRA – Celulose Nipo Brasileira](#)



[CMPC Celulose Riograndense](#)



[Eldorado Brasil Celulose](#)



indústria brasileira de árvores

[IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores](#)



[Klabin](#)



[Lwarcel Celulose](#)



[Pöyry Silviconsult](#)



[Stora Enso Brasil](#)



[Suzano Papel e Celulose](#)

Uma realização



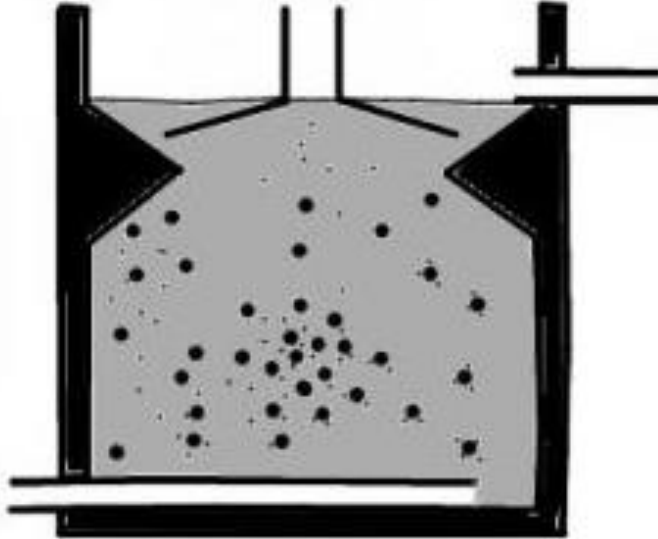
Autoria: Celso Foelkel



As biotecnologias continuam a mostrar oportunidades excepcionais ao setor de celulose e papel...



Agradecimentos



Reator UASB ("Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor")

Processo anaeróbico de alta eficiência na remoção de matéria orgânica de efluentes

Com esse capítulo, esperamos estar colaborando para um maior entendimento acerca de realidades e potencialidades que a biotecnologia oferece no tratamento de efluentes industriais, dessa vez debatendo as oportunidades no tratamento anaeróbico dos mesmos.

Esse capítulo tem a missão de dar continuidade aos nossos textos sobre aplicações da biotecnologia no setor de celulose e papel, mais uma vez em temas ambientais. Escolhemos como base de discussões para esse terceiro capítulo de fundo ambiental alguns processos biotecnológicos envolvendo uma interessante oportunidade que as empresas do setor de base florestal poderiam aproveitar mais em suas operações, em especial em tratamentos do tipo "rins purificadores" de efluentes setoriais com altas cargas de matéria orgânica contaminante ("kidney treatments").

Através do tratamento anaeróbico de efluentes de baixo fluxo contendo altas concentrações em material orgânico dissolvido (ou mesmo em suspensão) é bem possível se utilizar tratamentos setoriais de pequenas dimensões para reduzir substancialmente os impactos ambientais e os custos efetivos na depuração de águas, conseguindo-se assim melhorias significativas para o meio ambiente e para as operações fabris. Em algumas situações, esses tratamentos favorecem inclusive a recirculação da água tratada, melhorando

dessa forma o fechamento do circuito e a redução do consumo de água da fábrica. Eles também permitem a geração de um gás combustível conhecido como biogás, um valioso energético para uso na planta industrial onde gerado.

Existe muita literatura disponível sobre tratamentos anaeróbicos, seja para diversos tipos de processos, como alimentícios, têxteis, metalúrgicos, sanitário municipal e também de produção de celulose e papel. Essa bibliografia engloba artigos, palestras, apostilas e aulas de professores de universidades que as disponibilizam em seus websites. Frente a essa diversidade enorme de informações tecnológicas, optei por compor um capítulo de conceitos fundamentais amplos, oferecendo a vocês algo simples, versátil, prático e mais que tudo - didático.

Evidentemente, não se trata de um texto para aqueles que são doutores no assunto. Nosso objetivo é exatamente outro – que estudantes, professores, políticos, administradores, legisladores, financistas, agricultores, jornalistas, etc., enfim, as chamadas partes interessadas da sociedade, possam conhecer mais sobre os processos de tratamentos anaeróbicos de efluentes contaminados com matéria orgânica de fábricas de celulose e papel. Essa tecnologia mostra interessantes potenciais para sistemas de tratamento de efluentes setoriais de altos níveis de contaminação, ou para tratamentos conjugados aos sistemas aeróbicos que usualmente são adotados pelo setor de celulose e papel. As vantagens associadas a esses tratamentos são muitíssimo atrativas ao setor, como reduções de consumos de energia, de geração de lodos, de utilização de espaços e de diminuição de investimentos, além das possibilidades de recuperação de águas servidas e de produção de biogás.

Quero principalmente agradecer a alguns autores que têm disponibilizado textos de alta qualidade técnica e que podem perfeitamente se complementarem ao que estamos trazendo com esse capítulo. Graças a eles, tanto eu como vocês, poderemos enriquecer ainda mais nossos conhecimentos sobre esses processos biotecnológicos e suas causas de sucesso. Meu agradecimento, portanto, a alguns amigos e diversos outros técnicos e cientistas geradores e difusores do conhecimento acerca de processos anaeróbicos para depuração de resíduos poluentes, sendo que eles enriquecem nossa literatura setorial com suas contribuições tecnológicas, em especial a:

- Adela Tatiana Rodriguez Chaparro
- Alexandro Coelho
- Alfred Helble
- Allan M. Springer

- Almut Reichart
- Ana Paula Santana Loures
- Andréa Paula Buzzini
- Anil Kumar
- Christian H. Möbius
- Eduardo Cleto Pires
- Elizabeth Tilley
- Gatze Lettinga
- Jaakko Puhakka
- José Luis Sanz
- Jukka Rintala
- Jules B. van Lier
- Kevser Cirik
- Laíze Guimarães Guaglianoni
- Leo H.A. Habets
- Marcelo A. Nolasco
- Márcia Dezotti
- Marcos Eduardo de Souza
- Mauro Donizeti Berni
- Míriam Cristina Santos Amaral
- Mukesh Doble
- Mustafa Evren Ersahin
- Nádia Teresinha Schröder
- Osvaldo Luís Vieira Faria
- Perry L. McCarty
- Renato Carrhá Leitão
- Sílvio Romero
- Tatiana Chaparro
- Wagner David Gerber

Já a todos vocês leitores, agradeço mais uma vez toda a atenção e o imenso apoio. Todos vocês nos têm ajudado - e muito - a fazer do **Eucalyptus Online Book** algo muito útil para os técnicos e interessados por esse nosso setor de celulose e papel.

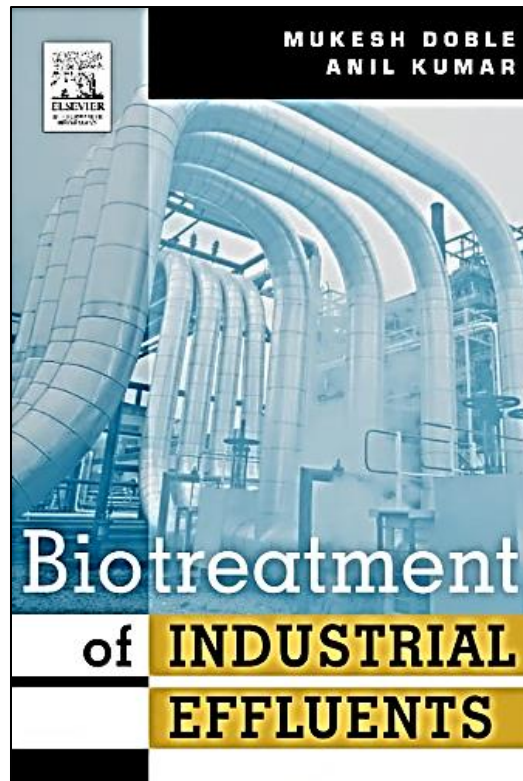
A todos, um abraço fraterno e um enorme muito obrigado.

Celso Foelkel

=====

**Aplicações da Biotecnologia em Processos Ambientais da
Fabricação de Celulose Kraft e de Papel de Eucalipto:**

Tratamentos Anaeróbicos de Efluentes Industriais



Um livro referencial para leitura

CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- REVENDO CONCEITOS SOBRE A BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL
- A DIGESTÃO ANAERÓBICA COMO FERRAMENTA BIOTECNOLÓGICA PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS
- ENTENDENDO AS PARTICULARIDADES DA DIGESTÃO ANAERÓBICA
- FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DOS PROCESSOS ANAERÓBICOS
- TRATAMENTOS ANAERÓBICOS DE EFLUENTES

- REATORES ANAERÓBICOS E FORMAS DE TRATAR EFLUENTES POR MÉTODOS ANAERÓBICOS
- UTILIZAÇÃO DE TRATAMENTOS ANAERÓBICOS DE EFLUENTES INDUSTRIAIS NO SETOR DE CELULOSE E PAPEL
- CONSIDERAÇÕES FINAIS
- REFERÊNCIAS DA LITERATURA E SUGESTÕES PARA LEITURA



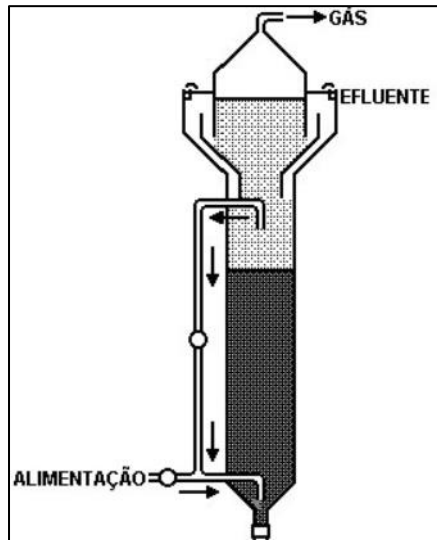
Outro livro referencial para vocês lerem...

O tratamento de efluentes industriais evolui rapidamente em suas tecnologias e os processos biotecnológicos poderão estar cada vez mais presentes – especialmente nas fábricas de celulose e papel que são grandes geradoras de efluentes, contendo matéria orgânica para ser tratada.



Aplicações da Biotecnologia em Processos Ambientais da Fabricação de Celulose Kraft e de Papel de Eucalipto:

Tratamentos Anaeróbicos de Efluentes Industriais



Reator anaeróbico de leito fluidizado
Fonte da figura: CETESB - 2014

REVENDO CONCEITOS SOBRE BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL

A biotecnologia ambiental nada mais é do que a aplicação de técnicas biotecnológicas para resolver, prevenir, mitigar ou monitorar problemas de contaminação ambiental. Na área industrial do setor de celulose e papel ela é, com certeza, o tipo de biotecnologia com maior número de utilizações atualmente sendo adotadas.

Basicamente, a biotecnologia ambiental se apoia no uso de enzimas, microrganismos e até mesmo de organismos superiores para aplicações em:

- Tratamento de poluentes, para descontaminação aérea, hídrica ou de resíduos sólidos;
- Geração de biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos (biogás, biohidrogênio, etanol lignocelulósico, etc.);

- Identificação de problemas de toxicidade ambiental;
- Conversão ou passivação de produtos tóxicos ou perigosos;
- Conversão de resíduos poluentes em produtos úteis à sociedade (Exemplos: compostagem de resíduos sólidos, digestão anaeróbica de material orgânico para produção de biogás e biofertilizante, etc.);
- Remediação de situações ambientais críticas;
- Biomonitoramento ambiental; etc.

Todos os processos da biotecnologia ambiental sempre se apoiam em alguns fundamentos básicos, quais sejam:

- Correta identificação do tipo de poluente ou resíduo a ser tratado, a sua concentração e a sua biodegradabilidade;
- Identificação de agentes biológicos que serão incumbidos de biodegradar o poluente de forma segura, eficiente e permanente (microrganismos, enzimas, plantas, consórcio de organismos, etc.);
- Identificação das condições ideais para que o tratamento seja seguro, efetivo e eficiente;
- Avaliar os impactos ambientais, sociais e econômicos desse tratamento;
- Mensurar os custos operacionais e de investimentos associados a essa aplicação biotecnológica;
- Comparar com outros tipos de tratamento ou tecnologias capazes de realizar o mesmo tipo de conversão;
- Identificar as periculosidades envolvidas para trabalhadores, comunidades e meio ambiente;
- Identificar efeitos ambientais sobre os seres vivos (microrganismos ou seres superiores);
- Identificar alterações ambientais sobre os diferentes constituintes do meio biótico em ações de biomonitoramento.

Diversas biotecnologias ambientais já estão sendo praticadas rotineiramente pelo setor de celulose e papel em suas áreas industriais:

- ↻ Tratamento aeróbico de efluentes por processos como lodos ativados, lagoas aeradas, etc.;
- ↻ Tratamento anaeróbico de efluentes e de resíduos sólidos;
- ↻ Tratamento de contaminantes gasosos (biofilmes);
- ↻ Compostagem aeróbica de resíduos sólidos;
- ↻ Compostagem anaeróbica de resíduos sólidos para geração de biofertilizante e biogás de forma simultânea;
- ↻ Utilização de enzimas específicas para destruição de poluentes ou contaminantes de processo de difícil degradabilidade;
- ↻ Utilização de plantas para tratamento de efluentes (tratamentos por leitos cultivados ou "wetlands", fitorremediação, etc.);
- ↻ Biorremediação de solos contaminados;
- ↻ Reabilitação de áreas degradadas por poluentes, extração de brita ou solo, etc.;
- ↻ Avaliação de ecotoxicidade e de impactos ambientais;
- ↻ Biomonitoramento ambiental, etc.

A biotecnologia ambiental não é algo recente no setor. Antes mesmo dela se converter em um ramo virtuoso e promissor da biotecnologia, já existiam práticas ambientais adotadas pelo setor, mesmo que de forma primitiva. É o caso das antigas e enormes lagoas de polimento usadas para melhoria da qualidade de efluentes industriais, que recebiam nas fábricas quando muito um tratamento primário para remoção de alguma quantidade de sólidos suspensos.

Felizmente, a temática ambiental evoluiu muito no setor de celulose e papel, em especial com a adoção de diversos tipos de processos biotecnológicos. A grande vantagem da biotecnologia é que os organismos utilizados para a conversão dos contaminantes exigem apenas condições adequadas para viverem bem e alguns aditivos para sua nutrição (nutrientes como nitrogênio e fósforo). Eles não recebem salários e a principal fonte de alimentos oferecida para eles é a própria carga poluente que terão a missão de eliminar ou

minimizar. Mesmo assim, os custos dessas biotecnologias não são pequenos, apesar de bastante compatíveis com as ansiedades do setor, pela excelente relação benefício/custo.

Graças às efetividades e rendimentos excepcionais desses processos, além da grande segurança ambiental e de saúde ocupacional que oferecem, as biotecnologias ambientais no setor de celulose e papel mostram ainda enormes potenciais para crescimento em curto prazo.

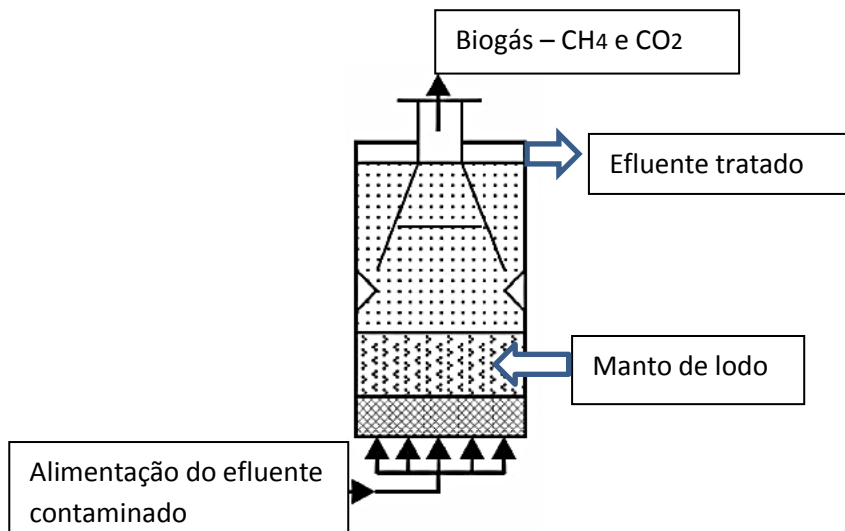


Reator anaeróbico da empresa Cambará S.A. – Brasil

Objetivo: Tratamento de condensados da evaporação – Processo sulfito ácido



A DIGESTÃO ANAERÓBICA COMO FERRAMENTA BIOTECNOLÓGICA PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS



A digestão anaeróbica é uma das principais formas de decomposição e estabilização da biomassa orgânica e vegetal que existe no planeta Terra. Ela consiste em um processo absolutamente natural que ocorre em ausência de oxigênio e que permite que microrganismos especializados utilizem resíduos orgânicos sólidos ou líquidos para obter energia e alimentos para sua vida. Trata-se, portanto, de um processo de conversão e de transferência de matéria orgânica e não apenas da simples destruição da mesma. Isso porque parte da matéria orgânica decomposta se converte em corpos de microrganismos, o que colabora para a renovação do material orgânico no planeta. Sua grande vantagem ambiental é que ela acontece sobre resíduos orgânicos e que poderiam, de uma forma ou outra, serem considerados como lixo, seja na própria aceitação da palavra (dispostos em efluentes ricamente orgânicos e em aterros sanitários ou industriais) ou como detritos acumulados pela própria mãe Natureza (em sedimentos e detritos em fundos de rios e lagos). Acredita-se que naturalmente, a digestão anaeróbica seja responsável pela estabilização de cerca de 5 a 10% de toda a matéria orgânica residual e presente no planeta para decomposição.

A digestão anaeróbica é também conhecida como **biometanização** ou **biogaseificação**, pois envolve a formação do metano, que é um gás combustível derivado da decomposição microbiológica do material orgânico. Através da digestão anaeróbica da matéria orgânica se consegue a produção desse gás, que pode inclusive ser utilizado em instalações domésticas, industriais, agrícolas ou de geração pública de eletricidade. Dentre todos os

processos de gaseificação da biomassa (pirólise, gaseificação, carbonização, torrefação e destilação térmica) é o único processo que se realiza em baixas temperaturas (entre 15 a 65°C).

A digestão anaeróbica é um processo natural de oxidação biológica da matéria orgânica que ocorre sem a participação do oxigênio gasoso molecular. Os microrganismos que realizam esse processo se valem do gás carbônico (CO₂) e dos íons nitrato (NO₃)⁻, sulfato (SO₄)²⁻ e clorato (ClO₃)²⁻ para processarem as trocas de elétrons em seu processo de respiração de obtenção de energia. O resultado final dessa decomposição é um gás úmido constituído de gás carbônico, metano, nitrogênio, amônia, hidrogênio, gás sulfídrico e traços de outros gases – a esse gás misto se denomina de **biogás**. Os principais constituintes do biogás são: metano (60 – 70% em volume) e gás carbônico (30 a 40%). Os demais gases aparecem em proporções muito pequenas.

Além do gás, obtém-se um resíduo orgânico com variado teor de cinzas, que é resultante da fração recalcitrante do substrato, que não é atacada pelos microrganismos, além de conter proporção significativa de corpos de microrganismos que sobraram ao final do processo. Esse resíduo orgânico tem características de húmus e é também denominado de **lodo anaeróbico, biofertilizante** ou de **composto orgânico anaeróbico**. Sua utilização agrícola é muito apreciada e seu sucesso comercial tem sido comprovado em inúmeras situações no agronegócio global. Trata-se, portanto, de outra forma de se produzir um composto agrícola pronto e estabilizado com finalidades fertilizantes, conforme já discutido em outros capítulos do Eucalyptus Online Book (Vide capítulos 34 e 35).

A vantagem desse procedimento anaeróbico é que ele permite a obtenção de três produtos (biogás, composto orgânico e líquido descontaminado ou efluente tratado) – porém, deve ser executado em condições tais que se recupere o biogás, rico em metano. Caso isso não seja feito, essa forma de tratamento poderá ter altos impactos ambientais, pois lançará grandes quantidades de metano para a atmosfera, um gás que tem elevado poder de promover o efeito estufa e o aquecimento global.

De uma maneira geral, pode-se dizer que a digestão anaeróbica oferece dois produtos comerciais para a sociedade humana, quando utilizada em processos industriais ou agrícolas, e até mesmo domésticos (em lares de cidadãos):

- Biogás: gás combustível incolor, com cheiro característico de metano ou de gás sulfídrico, com razoável poder calorífico;

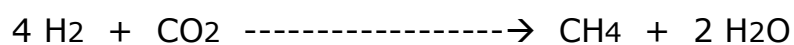
- Biofertilizante: composto orgânico isento de odor e de baixos níveis de patogenicidade, rico em húmus e em nutrientes e com grande poder de atuação como fertilizante agrícola. O teor de nutrientes é função do substrato utilizado e da extensão com que se procedeu a digestão anaeróbica (ou seja, da redução do teor de carbono da matéria orgânica com conseqüente redução das relações C/N e C/P).

Por substrato entenda-se o meio que serve de alimento para os microrganismos, que pode ser um efluente rico em poluentes orgânicos, um resíduo sólido de natureza orgânica, etc.

Quando a digestão anaeróbica é utilizada para tratamento de líquidos (efluentes contaminados), além do biogás e do biofertilizante, ela também conduz a um líquido com muito menores níveis de contaminantes orgânicos, que pode continuar tratamento de polimento por outros processos (aeróbicos ou oxidação química) ou que pode ser recirculado para reuso na própria instalação industrial que o tratou.

A biogaseificação ou produção de gás metano pela decomposição de sedimentos orgânicos é um fenômeno que a humanidade conhece há séculos. O conhecido "gás de pântano" sempre foi notado pelo ser humano, ao ser expelido na forma de bolhas ascendentes em locais de águas paradas e ricas em sedimentos orgânicos depositados no leito do corpo d'água. Entretanto, demorou um razoável tempo para que a ciência identificasse como sendo o metano o principal composto presente nesse gás e as suas rotas de formação. Somente em 1776 é que o físico italiano Alessandro Volta relatou a presença de metano nesse biogás formado em situações de anaerobiose e decomposição de restos orgânicos em ausência de oxigênio. Inicialmente, esse gás foi denominado de "ar combustível", pois se inflamava facilmente na presença de fogo. Mais tarde, em meados do século seguinte, entre 1860 a 1890, entendeu-se que o gás metano era formado pela mediação de microrganismos em um processo de decomposição anaeróbica.

A primeira reação identificada e relatada na literatura foi apresentada como sendo a seguinte:



...porém, essa reação corresponde a apenas uma das rotas de formação do metano e não é a mais importante.

Anos mais tarde, com o avanço da ciência, passaram a serem identificados os microrganismos formadores do metano e que são responsáveis por essa decomposição anaeróbica. Dentre esses microrganismos e com as correspondentes homenagens aos descobridores por seus feitos, foram gradualmente sendo descobertos e denominados os seguintes organismos:

Methanobacillus omelianskii

Methanococcus vannielli

Methanosarcina barkeri

Methanobacterium formicicum

Archaea methanogens

...dentre outros - e que a todos se denominaram genericamente de organismos metanogênicos.

Em geral, a produção de biogás tem sido associada ao seu uso próximo ao local de geração. Dessa forma, a recuperação da energia costuma ser feita pelo próprio gerador do biogás - e em última análise, pelo gerador do resíduo que está sendo decomposto anaerobicamente. Isso tem sido assim em propriedades rurais, em indústrias do agronegócio e que são grandes geradoras de resíduos orgânicos e em estações de tratamento de efluentes (sanitários, domésticos e industriais). Tanto os efluentes ricos em material orgânico são potenciais para a digestão anaeróbica, como os lodos orgânicos de outros tipos de tratamento podem ser candidatos à decomposição anaeróbica para produção de biogás e composto orgânico.

O resultado muito interessante dessa biodeterioração é que ela acontece sobre materiais sólidos e também sobre materiais orgânicos dissolvidos. Portanto, essa sua versatilidade permite que atue sobre efluentes com sólidos suspensos orgânicos, desde que de pequenas dimensões. É o caso de efluentes de fábricas de celulose e papel contendo fibrilas e fibras e em efluentes sanitários contendo partículas de detritos humanos, nesse último caso desde que fragmentados previamente.

A digestão anaeróbica como geradora de biocombustível teve fortes avanços entre os anos de 1900 e até o final da segunda grande guerra. Com a expansão do uso do petróleo e do gás natural, as tecnologias baseadas na digestão anaeróbica para geração do biogás tiveram seu desenvolvimento relativamente estagnado, e isso

aconteceu até anos recentes. À exceção de algumas estações de tratamento de efluentes, que possuem recomendações legais cada vez mais fortes para reduzir ou para darem destino adequado a seus resíduos sólidos (biossólidos ou lodos orgânicos), grande parte da indústria e das municipalidades ainda não identificaram claramente essas tecnologias anaeróbicas como uma forma excepcional de agregação de sustentabilidade aos seus negócios empresariais e públicos.

As tecnologias de produção de biogás e de biofertilizante possuem enorme potencial para inúmeras atividades da economia, dentre as quais se destacam:

- Estações de tratamento de efluentes ricos em cargas orgânicas e geradoras de lodos de natureza fortemente orgânica;
- Aterros sanitários e aterros industriais com estocagem de resíduos ricos em matéria orgânica;
- Indústrias do agronegócio que possuam grandes quantidades de resíduos orgânicos (alimentícia, celulose e papel, etc.);
- Atividades tipicamente rurais, com alta geração de líquidos ou resíduos contaminados com estrumes, fezes, urinas, etc.;
- Lares de cidadãos em situações onde se oportunize que eles possam tratar seus resíduos e gerarem biogás para uso doméstico.

Uma das vantagens oferecidas pela digestão anaeróbica é que ela pode ocorrer inclusive com a consorciação de resíduos ou de efluentes. Isso significa que diversos substratos podem ser misturados e dosados na alimentação dos biodigestores ou reatores com a finalidade de codigestão. Com esse consórcio de resíduos pode-se aumentar a escala de produção e também se obter outras vantagens processuais e operacionais, tais como:

- Diluição de contaminantes tóxicos, patogênicos ou de inibidores da digestão;
- Equalização e distribuição mais adequada de nutrientes;
- Aumento da carga de biomassa biometabolizável anaerobicamente;
- Aumento na produção de biogás para utilização interna na empresa (é o caso onde empresas industriais se associam às

municipalidades para tratamento de esgotos domésticos consorciados a seus efluentes);

- Favorecimento de consórcios de microrganismos desejáveis;
- Favorecimento de algumas das fases da biodeterioração anaeróbica;
- Aumento da atividade biológica, e com isso, consequentes aumentos em rendimentos e produções.

Entretanto, nesse processo de cogeração de diversos substratos, devem-se tomar certos cuidados:

- Evitar introduzir patogenicidade ou inibidores enzimáticos ou de natureza química;
- Evitar introduzir elementos tóxicos a exemplo de metais pesados;
- Não introduzir necessidades adicionais de purificações complementares;
- Não introduzir variabilidade exagerada na mistura de substratos.

Apesar de a digestão anaeróbica provocar redução importante na patogenicidade de certos resíduos orgânicos (como fezes de suínos, esterco animal, efluentes sanitários), ela não é absolutamente eficaz para esterilizar substratos. Enganam-se aqueles que acreditam que possam esterilizar seus substratos orgânicos contaminados como os restos hospitalares, lixo perigoso, etc. Sabe-se que a digestão anaeróbica consegue reduzir entre 80 a 100% da presença de diversas espécies de patógenos nocivos ao ser humano: *Salmonella*, *Mycobacterium*, *Ascaris*, poliovírus, vibriões, cistos de parasitas, ovos de insetos, etc. Por essa razão, caso se queira uma produção de biofertilizante saudável ou de efluente pouco patogênico, deve-se cuidar muito da qualidade dos substratos em decomposição, já que níveis residuais de patogenicidade podem persistir em alguma extensão.

A digestão anaeróbica não é um processo natural simples. Ela consiste na verdade de uma sequência de eventos biológicos que se sucedem, um a seguir ao outro – e de forma absolutamente ordenada e necessária. Cada etapa é responsável pela modificação do substrato para oferecer um novo e adequado substrato para a fase seguinte. Por essa razão, o processo é demorado e, quando utilizado em escala

produtiva, precisa ser muito bem entendido e monitorado para máximos rendimentos.

Cada substrato tem um potencial distinto e esse potencial é função de seus constituintes orgânicos e inorgânicos. Evidentemente, quanto mais orgânico for o substrato, maior será o seu potencial, mas existem restrições. Existem substâncias orgânicas mais recalcitrantes ou mais refratárias à decomposição biológica: lignina, compostos orgânicos halogenados, suberina, extrativo polifenólicos, etc.

A lignina, um dos principais constituintes da biomassa vegetal, é relativamente recalcitrante à hidrólise, etapa onde a matéria orgânica complexa é fragmentada em moléculas mais simples. Por essa razão, uma fração importante da lignina acaba se concentrando no lodo residual ou biofertilizante para atuar como material humificado. Também os compostos orgânicos persistentes e alguns halogenados costumam resistir à biodegradação anaeróbica e se concentram na biomassa residual ou biofertilizante. Entretanto, existem muitas comprovações científicas de que muitos compostos halogenados, conhecidos vulgarmente como "AOX – Compostos Halogenados Adsorvíveis" acabam sendo decompostos e inativados pela digestão anaeróbica. Isso é muito apropriado, já que os lodos orgânicos de fábricas de celulose e papel que trabalham com o branqueamento da celulose com compostos clorados, acabam contendo teores variados de AOX.



Interior de reator anaeróbico
Fonte: Cambará S.A.

Para se entender bem como essa decomposição anaeróbica da matéria orgânica acontece em condições naturais de ausência de oxigênio molecular, é importante se conhecer bem as diversas fases do processo, que podem ser apresentadas como as seguintes:

Fase 1: Hidrólise

Nessa fase, as bactérias fermentativas hidrolíticas transformam o material orgânico complexo em compostos de menores pesos moleculares através de reações de degradação com a participação de água. Com isso, as proteínas são convertidas em aminoácidos; os lipídeos em ácidos graxos de cadeias longas; os carboidratos em açúcares mais simples e também em ácidos e álcoois. O substrato precisa estar em situação de alta umidade, por isso, essa digestão costuma ser realizada em substratos bem diluídos em água – e também nos efluentes hídricos ricos em poluentes orgânicos.

Fase 2: Acidogênese

Os produtos resultantes da hidrólise são a seguir trabalhados por bactérias acidogênicas fermentativas que se alimentam deles e excretam substâncias orgânicas bastante simples conhecidas como AOV's – Ácidos Orgânicos Voláteis. Dentre esses ácidos, destacam-se: acético, fórmico, butírico, propiônico, láctico e mais o etanol e o metanol. Nessa fase também são liberados gases como: gás carbônico, hidrogênio, amônia e gás sulfídrico (sulfeto de hidrogênio).

O H₂S é um gás corrosivo e de odor desagradável, sendo também moderadamente tóxico para os organismos que executam a metanogênese. Por isso, quando os teores de sulfatos forem altos nos substratos, a digestão anaeróbica pode ser prejudicada, já que existe uma competição das bactérias redutoras de sulfato com as metanogênicas. Já quando os teores de sulfatos são baixos, os microrganismos redutores de sulfatos acabam se associando aos microrganismos metanogênicos típicos e podem também colaborar com a produção de acetatos e hidrogênio, favorecendo e não prejudicando a digestão anaeróbica.

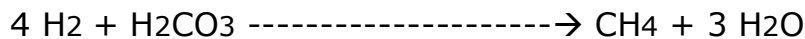
Fase 3: Acetogênese

Nessa fase, as bactérias acetogênicas produzem acetatos e hidrogênio a partir dos ácidos orgânicos liberados na fase anterior. Essa fase é de vital importância para a produção de metano, já que tanto os acetatos como o hidrogênio são as fontes de insumos para a produção de metano. Essa é, portanto, a fase mais crítica e da qual dependem os rendimentos para a produção do biogás.

Fase 4: Metanogênese

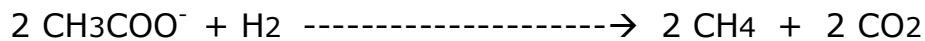
Nessa etapa, os organismos metanogênicos produzem o metano a partir de duas rotas de formação, conforme utilizem os acetatos ou o hidrogênio como insumos básicos. Acredita-se que cerca de 70% do metano produzido seja derivado dos acetatos e o restante do hidrogênio. Essas suas rotas são denominadas de metanogênese hidrogenotrófica e metanogênese acetotrófica ou acetoclástica.

Metanogênese hidrogenotrófica



O ácido carbônico nada mais é que a fase aquosa do gás carbônico.

Metanogênese acetotrófica ou acetoclástica



As quatro fases e as duas rotas da última fase precisam estar alinhadas, já que cada fase sucede a precedente. Pode também haver competição, antagonismo ou inibição de uma fase sobre outra, se as condições do processo forem inadequadas. Isso é particularmente importante para os processos contínuos, onde os biodigestores e os reatores são divididos em câmaras para que em cada uma delas suceda uma ou mais dessas fases. Por isso, os reatores precisam ser muito bem engenheirados, controlados e estabilizados para máximos rendimentos. Qualquer uma das fases, se mal conduzida ou mal controlada, pode ser limitante da fase seguinte, e com isso, ser reduzida a quantidade e a qualidade do biogás formado. Essa é uma das razões para que se encontrem amplas faixas de teor de metano no biogás produzido pelos diversos tipos de biodigestores (entre 45 a no máximo 70%). A outra razão é a qualidade do substrato original.

A biodigestão anaeróbica é um processo que ocorre lentamente na Natureza, tomando entre 30 a 180 dias para que as quatro fases se sucedam uma após a outra, seja nos sistemas domésticos como nos industriais. Em condições industriais controladas e engenheiradas, a digestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos pode acontecer em tempos muito mais curtos e possuir mesmo assim, excelentes rendimentos.

Em especial, nos reatores de digestão anaeróbica de altas taxas e com recirculação de lodo para efluentes orgânicos na forma líquida, consegue-se reduzir o tempo de residência do tratamento para poucas horas ao invés de semanas. De qualquer forma, há que se conhecer a microbiologia (organismos envolvidos e suas condições de ótimo desempenho), a composição do resíduo e a teoria do processo em todas as suas fases para se aventurar com sucesso nesse tipo de processamento biotecnológico.

Uma vez que as bactérias anaeróbicas não utilizam oxigênio molecular e sim o oxigênio combinado em íons como sulfato, clorato, nitrato e no próprio gás carbônico como aceptores de elétrons, há que disponibilizar os mesmos nos substratos. Caso eles não estejam presentes em quantidades requeridas nas matérias-primas, as reações não acontecem ou acontecem muito pobremente.

Também é muito importante que se possa atuar e se ter controles para as três fases vitais do processo:

- Hidrólise – onde tudo se inicia;
- Acidogênese – para a produção de ácidos orgânicos voláteis, que são os alimentos para as bactérias metanogênicas;
- Metanogênese – onde se forma o metano.

Balancear o processo, entender suas fases e suas exigências, conhecer as necessidades biológicas e oferecer condições de ótimo desempenho são as principais causas para o sucesso na produção industrial de biogás e biofertilizante. São também vitais para se conseguir boas eficiências de redução da contaminação de efluentes ricos em matéria orgânica.

Caso o biogás não seja formado e extraído, a poluição só mudará de constituintes no líquido – ao invés de poluentes orgânicos com moléculas orgânicas complexas, teremos poluição orgânica de moléculas mais simples de ácidos orgânicos voláteis. Não deixa de ser poluição, e difícil de tratar.

Inicialmente, é preciso entender como funciona a microbiologia do sistema e com quais fatores de eficiência podemos melhorar o desempenho da metanogênese como um processo global. Melhorar o crescimento microbiológico consiste na verdade em acompanhar e otimizar o desenvolvimento das bactérias anaeróbicas e facultativas, o qual ocorre de acordo com as seguintes etapas distintas:

Etapa 01: Adaptação ou Retardo

É a fase inicial onde os microrganismos estão se adaptando ao substrato e às condições ambientais vigentes. Mesmo com a adição de inóculos especializados, essa fase de adaptação toma certo tempo em função das condições de diluição em água, temperatura, pH, equilíbrio de nutrientes, etc. Nessa fase, a presença de alguma contaminação com oxigênio não é tão crítica, pois existem bactérias facultativas que o utilizarão.

Etapa 02: Crescimento logarítmico

Quando os microrganismos se adaptam ao meio, o crescimento populacional ocorrerá de forma intensa e em razão logarítmica.

Etapa 03: Estabilização populacional

A população estabilizará em número de indivíduos, atingindo seu máximo populacional, já que a oferta de alimentos estará se reduzindo em função do consumo. O surgimento de novas células passará a equivaler ao número de células que morrem e que passam também a servir de alimento por intenso canibalismo.

Etapa 04: Mortalidade logarítmica

É o final do processo, quando o alimento metabolizável se esgota e o canibalismo passa a ser a única forma de obtenção de comida. É importante se lembrar de que uma fração da matéria orgânica inicial do substrato se converte em corpos de microrganismos e que esses corpos em parte serão canibalizados e em parte estarão presentes na constituição do biofertilizante. O lodo extraído ou biofertilizante conterá ainda o residual de substrato recalcitrante.

Quanto maior for o consumo de matéria orgânica pelos organismos remanescentes, inclusive pelo canibalismo dos seus próprios companheiros, maior será a geração de metano e menor será a geração de lodo a ser extraído. A morte dos microrganismos também favorece a ciclagem de nutrientes para os sobreviventes.

É muito importante se acompanhar a cinética da decomposição anaeróbica. Isso se faz através de:

- Acompanhamento da velocidade do crescimento populacional microbiológico;
- Utilização e modificações no substrato;
- Formação de produtos da degradação anaeróbica: hidrogênio, gás carbônico, metano, acetato, ácidos graxos voláteis, gás sulfídrico, etc.
- Avaliações do potencial de formação de metano de um resíduo ou efluente e como a digestão sendo executada em reatores está conseguindo aproveitar e converter esse potencial.

A cinética do processo oferece subsídios para a melhor engenharia e para a criação das melhores práticas operacionais em biodigestores e em reatores anaeróbicos. Ela nos dá a chance de entender as necessidades de tempos de residência em cada fase, das condições de ótimo para maximização das atividades metabólicas, das condições ideais para melhor estabilização do substrato a ser degradado, etc.

Pra fins de padronização de conceitos, vamos estabelecer que o termo **biodigestor** será utilizado para sistemas de biodeterioração anaeróbica de resíduos sólidos (lodos de esgoto, estrumes, etc.) e o termo **reator** para efluentes líquidos.

Um determinado resíduo ou efluente pode ter seu potencial de formação de metano medido de forma simples em sistemas laboratoriais onde se adiciona um lodo ativo e especializado como inóculo e se acompanha a formação de metano a partir da decomposição da matéria orgânica do resíduo ao longo do tempo. Os materiais são depositados em um frasco hermético com uma saída apenas para o gás formado, que pode ser medido por ensaios químicos ou gasosos. Esse teste, muito usual em laboratórios de pesquisa, se denomina de "BMP – Biochemical Methane Potential", existindo nas citações bibliográficas desse capítulo um artigo que mostra claramente o procedimento de execução do mesmo.

A atividade microbiológica da metanogênese costuma ser também avaliada pela medição da AME – Atividade Metanogênica Específica. Isso se faz através de medições que procuram relatar a velocidade de formação do metano em relação à matéria orgânica presente no substrato. Para isso se utilizam de Respirômetros de Warburg ou de manômetros com sensores para monitorar a produção de biogás. Entretanto, como o biogás é um gás misto, não apenas a quantidade formada de gases é importante, porém mais que isso, é

importante se determinar a composição do mesmo para melhor interpretação de desempenhos.



www.respirometros.com
el sitio de referencia # 1 en respirometría y sus aplicaciones.

Home

- Fundamentos
- Aplicaciones
- The Library
- Links

Fundamentos

RESEÑA Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

La utilización de respirometros de distinto tipo, con el objetivo de realizar medidas directas

Thomas Irwin, M.S. Environmental Scientist/Rutgers
Envíe su consulta consultas@engineer.com hoy!

B&B LatAm TOP 5

Respirômetros em:
<http://www.engineeringfundamentals.net/Respirometros/fundamentos.htm>



Ensaio BMP – “Biochemical Methane Potential”
Fonte da figura: Moody e colaboradores, 2009

A avaliação da AME ou da BMP de substratos orgânicos como resíduos sólidos, biomassas e efluentes líquidos são ensaios laboratoriais muito parecidos em seus conceitos. Eles permitem se determinar o potencial desses materiais para serem degradados por digestão anaeróbica e para a geração de metano e gás carbônico.

A determinação criteriosa desses ensaios possibilita então:

- Quantificar a atividade metanogênica de materiais orgânicos através da anaerobiose;
- Avaliar o comportamento da digestão anaeróbica em função das condições aplicadas e do efeito de compostos estimulantes ou de inibidores;
- Identificar o grau de degradabilidade dos diferentes substratos;
- Medir a velocidade de formação do metano ao longo do tempo;
- Qualificar um material de inoculação em relação à sua efetividade a um determinado resíduo – isso em comparação a outros potenciais inóculos (ou sementes);
- Estabelecer relações entre o conteúdo de DQO (Demanda Química de Oxigênio) de um efluente ou resíduo sólido com a taxa de conversão dessa DQO em metano;
- Avaliar o potencial de eficiência de conversão anaeróbica de um determinado material orgânico;
- Estimar o nível de estabilização de um material orgânico em função da ação da anaerobiose;
- Identificar níveis e tipos de recalcitrância dos compostos presentes nos resíduos sendo testados;
- Estabelecer receitas para codigestão de consórcios de substratos;
- Monitorar as mudanças de fases e as atividades microbiológicas em substratos, dentre os quais, os lodos de estações de tratamento de efluentes;
- Identificar a acumulação de materiais inertes após longos períodos de operação dos biodigestores ou dos reatores;
- Determinar as cargas orgânicas máximas que podem ser alimentadas aos biodigestores;
- Avaliar rendimentos potenciais ou teóricos;
- Avaliar qualidades potenciais do biogás e do biofertilizante a serem produzidos;

- Avaliar qualidades potenciais do efluente após tratamento;
- Simular e oferecer possibilidades de otimizações em processos industriais.

A AME e a BMP costumam ser expressas como a quantidade de metano produzida pelo consumo de um determinado substrato, referindo-se o mesmo à quantidade de Sólidos Voláteis (SV) degradáveis ou totais. Por Sólidos Voláteis se entende a quantidade de matéria orgânica do substrato em questão. Os sólidos voláteis são entendidos nesse processo como o Alimento que os microrganismos utilizarão. Entretanto, nem toda matéria orgânica ou SV é metabolizável, sendo uma parte desses considerados como recalcitrante. Alguns técnicos preferem ao invés de apresentar os resultados em Sólidos Voláteis utilizar as concentrações ou cargas de DQO contida no substrato.

Esses ensaios na verdade podem-se confundir até mesmo com avaliações de biodegradabilidade de um resíduo, já que seus resultados se relacionam direta e intimamente com a DBO (Demanda Bioquímica ou Biológica de Oxigênio) desse mesmo resíduo.

Sabendo como avaliar a microbiologia bacteriológica e conhecendo bem as diversas fases do processo da digestão anaeróbica é possível se aperfeiçoar as condições do processo.

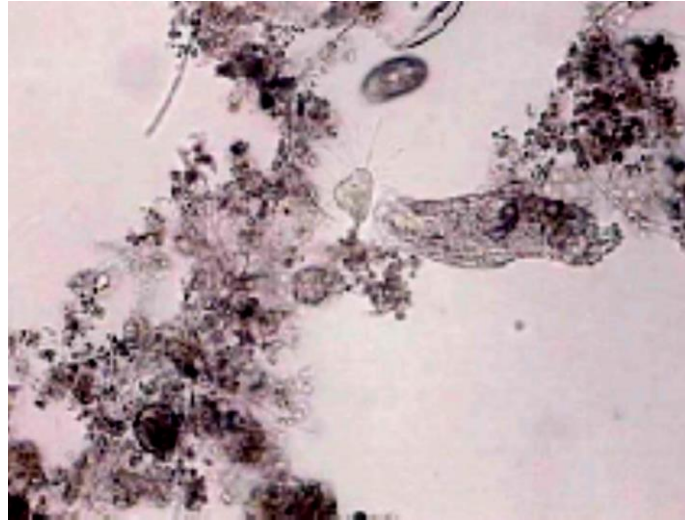
Sabe-se que existem diversas condições e variáveis críticas, que causam efeitos imediatos no desempenho do processo, esteja ele ocorrendo em condições naturais ou em biodigestores comerciais. Elas serão apresentadas e discutidas em uma próxima seção desse nosso capítulo.



Tratando efluentes para despoluição hídrica



ENTENDENDO AS PARTICULARIDADES DA DIGESTÃO ANAERÓBICA



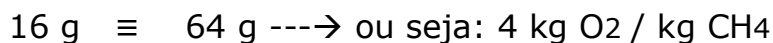
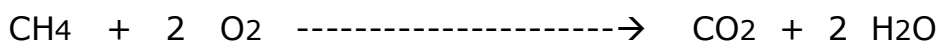
Lodo anaeróbico saudável

Fonte da figura: Habets & Yamanaka, SD

A digestão anaeróbica é um processo biotecnológico através do qual um conjunto de microrganismos especializados (especialmente bactérias) atua na degradação de compostos orgânicos presentes em poluentes sólidos ou líquidos e os decompõem seletiva e ordenadamente até a formação de metano e gás carbônico, sobrando um resíduo final que no caso de decomposição de resíduos sólidos é uma espécie de lodo humificado e no caso de efluentes líquidos são valores de materiais orgânicos, expressos como DQO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), que são recalcitrantes e incapazes de serem degradados nas condições que foram adotadas pelo processo. Sobra também, no caso de efluentes líquidos, um excesso de lodo removido do sistema, que consiste em material sólido não degradável (ou não degradado pelo tratamento como foi feito) e também corpos de microrganismos.

O metano na verdade é o principal produto obtido desse processo biotecnológico, podendo ser considerado como um produto intermediário dessa digestão biológica, já que se o processo continuasse, ele provavelmente seria convertido em gás carbônico (que é, da mesma forma que a água, o produto final da decomposição do carbono orgânico).

O consumo de oxigênio para estabilização do metano em CO_2 é elevado, logo o metano possui uma DQO relativamente alta. Isso se deve à seguinte reação de estabilização da molécula de CH_4 :



Exatamente por esse uso elevado de oxigênio que se incorpora ao carbono orgânico do metano, o gás carbônico é bem mais pesado que o gás metano, para cada molécula-grama correspondente. Ou seja, para cada 22,4 litros de metano ou de gás carbônico nas CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão), teremos 44 gramas de massa para o gás carbônico, enquanto para o metano teremos apenas 16 gramas. Por essa razão, embora o biogás formado na digestão anaeróbica apresente entre 45 a 70% de metano em sua composição volumétrica, a massa de gás carbônico no biogás é proporcionalmente mais significativa que a de metano.

O biogás não é um gás puro, pois ele apresenta umidade, além de contaminações com gás sulfídrico (H₂S) e traços de amônia (NH₃), nitrogênio molecular (N₂), hidrogênio (H₂) e outros gases, em função da composição do substrato sendo degradado.

A digestão anaeróbica tem sido estudada desde o final do século XIX e ela tem sido entendida como um processo capaz de degradar águas sépticas, esgotos, estrumes, lodos e outros materiais orgânicos passíveis de degradação biológica. Esses estudos acabaram levando a processos tecnológicos que foram desenvolvidos para tratamento de efluentes sanitários e industriais, bem como para lodos (biossólidos) de estações de tratamento de esgotos.

O principal avanço da digestão anaeróbica aconteceu na Holanda, a partir dos anos 80's, quando o grande cientista holandês Dr. Gatzke Lettinga e seus colaboradores desenvolveram os conceitos fundamentais para os reatores de alto desempenho com reciclo ou pela manutenção de altas cargas de biomassa de sólidos voláteis no interior do reator. Com isso, conseguiram reduzir o tempo de residência do tratamento, aumentar a efetividade e desempenho e proporcionar uma maior produção de metano por cada unidade de material orgânico degradado.

O reator UASB ("Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor") foi oficialmente estabelecido como uma forma inovativa de se tratar anaerobicamente os efluentes orgânicos a partir de 1983, em função dos estudos do Dr. Lettinga. Recentemente, o Dr. Gatzke Lettinga escreveu e lançou um livro contando toda essa história na obra que foi intitulada de "*My anaerobic sustainability story*" - trata-se, portanto de uma preciosidade disponível a quem se interessar por esse tema, sendo que detalhes disso podem ser encontrados na seção de referências da literatura.

Entretanto, mesmo anteriormente a esse desenvolvimento dos anos 80's, a digestão anaeróbica já vinha mostrando sua efetividade como forma de tratar efluentes industriais, sanitários domésticos, estrumes de criações zootécnicas, lodos orgânicos, etc. Já se conheciam os desempenhos das lagoas anaeróbicas para efluentes líquidos e de biodigestores anaeróbicos para degradação de resíduos orgânicos pastosos.

Pode-se dizer que existem disponíveis tecnologias para três tipos principais de tratamentos anaeróbicos:

1. Processos anóxicos: são processos para tratar efluentes ou resíduos sólidos pastosos com o objetivo de utilizar condições de ausência de oxigênio para desnitrificar os mesmos. Muitos resíduos ricos em nitrato, quando colocados em condições de anaerobiose, possibilitam o crescimento de microrganismos que utilizam o íon $(NO_3)^-$ para efetuar suas trocas de elétrons. A consequência disso é que o nitrato acaba sendo degradado biologicamente para nitrogênio molecular, que se libera inocuamente para a atmosfera.
2. Processos anaeróbicos para tratar resíduos sólidos pastosos (lodos primários, lodos secundários de tratamento por lodos ativados, estrumes, esterco, etc.). São processos de estabilização e de redução de peso seco desses resíduos, conseguindo uma redução de geração de lodo entre 60 a 80%, quando comparativamente a processos aeróbicos clássicos. Grande parte do peso seco do resíduo pastoso se transforma em biogás e não sobra como lodo para ter que ser descartado ou aterrado.

O reator costuma ser aquecido e alimentado de forma contínua ou intermitente com o resíduo. No interior do reator se desenvolvem as colônias de microrganismos, que atuam na degradação e estabilização da matéria orgânica.

Ao final do tratamento, o lodo estabilizado e rico em microrganismos é removido do reator para ser utilizado como biofertilizante ou para ser disposto em aterros.

O tempo de residência é de alguns dias, não sendo tão longo porque as colônias de microrganismos são muito populosas e especializadas nesse tipo de trabalho.

A taxa de remoção de microrganismos junto com o lodo não pode de forma alguma exceder a velocidade de formação dos mesmos no interior do reator, senão a população microbiológica vai diminuindo e a efetividade do tratamento se perde.

O processo anaeróbico aplicado a poluentes sólidos pastosos permite que se estabilize o resíduo, reduza o seu peso seco, diminua a sua toxicidade e patogenicidade e conduz à geração de um produto valioso que é o biogás.

São comuns os biodigestores de resíduos pastosos sendo utilizados em municipalidades, empreendimentos agrícolas e industriais. Na agricultura vêm-se difundindo muito para tratar excrementos de suínos, frangos e outros animais criados para comercialização em larga escala.

3. Processos para tratamento de efluentes líquidos em concentrações de DQO que variam entre 400 a 50.000 ppm.

São atualmente adotados diversos modelos de reatores de alto desempenho, com altas cargas aplicadas, com recirculação de lodo ou com manutenção de grandes concentrações de biomassa microbiológica ativa no interior do reator. Essa grande concentração de biomassa (lodo ou SSV – Sólidos Suspensos Voláteis para o caso de efluentes líquidos) favorece o contato dos microrganismos ativos da digestão anaeróbica com os poluentes orgânicos do líquido sendo tratado. Isso acaba acelerando o processo e reduzindo o tempo de detenção hidráulico do efluente no interior do reator.

Caso isso não ocorresse, os tempos de retenção deveriam ser muito maiores e os volumes dos reatores seriam proibitivos. É exatamente o que se pode notar no caso das antigas lagoas anaeróbicas, que eram enormes lagoas com longos tempos de retenção pelo fato de nem sempre acontecer o reciclo de lodo.

Alguns reatores são baseados no conceito de mínima retirada de lodo do seu interior. Eles não costumam ter sistemas de decantação e retorno de lodo – apenas evitam que o lodo saia do reator e mantêm a concentração elevada em espécies de mantos ou colchões de lodo internamente ao corpo do reator.

No caso de reatores com reciclo de lodo, existe um sistema de separação dos sólidos suspensos de lodo do efluente,

engrossamento desse lodo e retorno de parte do mesmo para o reator. Outra parte de lodo (ou excesso de lodo) é retirado do sistema como biofertilizante ou como resíduo sólido. Esse sistema é exatamente baseado no mesmo conceito dos tratamentos aeróbicos por lodo ativado.

A Idade do Lodo (tempo de permanência da biomassa no reator) é um dos principais fatores para governar o desempenho do reator:

Idade Lodo (dias) = (Quantidade Total de SSV no reator) / (Quantidade de SSV deixando o reator por dia)

A quantidade de SSV deixando o reator inclui tanto o excesso de lodo descartado como os SSV's que seguem com o efluente tratado e que eventualmente serão retirados em um decantador ou em outro processo de tratamento subsequente. Ou então, que se perderão para o corpo de água que receberá o efluente com certo teor de sólidos suspensos (mas dentro dos parâmetros legislados).



Esse capítulo do **Eucalyptus Online Book** que estamos lhes oferecendo agora tem a missão de se concentrar nas utilizações dos tratamentos anaeróbicos apenas para efluentes líquidos. Em capítulo anterior desse nosso livro virtual apresentamos um longo texto com muitas referências bibliográficas acerca das compostagens aeróbica e anaeróbica de resíduos sólidos da fabricação da celulose e papel.

Caso você se interesse em ler mais sobre isso, recomendamos que se dirijam a:

Aplicações da biotecnologia em processos ambientais da fabricação de celulose kraft e de papel de eucalipto: Compostagem de resíduos e geração de biogás. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 35. 152 pp. (2014)

http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT35_Compostagem_Residuos_Biogas.pdf

Historicamente, o processo anaeróbico tem sido destinado ao tratamento de efluentes com altas concentrações de material orgânico (com alta carga) - acima de 1.500 ou 2.000 ppm de DQO. No passado, antes do desenvolvimento dos reatores de alto desempenho, raramente se consideraria o uso de digestão anaeróbica para efluentes com concentrações menores do que essas.

Os efluentes de concentrações menores (entre 400 a 1.500 ppm DQO) também passaram a ter vantagens no tratamento anaeróbico - isso foi acontecendo conforme se desenvolviam os reatores anaeróbicos de maiores eficiências.

Anteriormente, há umas 3 a 4 décadas, os efluentes das fábricas de celulose e papel eram muito diluídos em função dos enormes consumos específicos de água que se utilizavam e das aberturas exageradas dos sistemas. Hoje, com as restrições em consumo de água, os sistemas foram se fechando, os consumos específicos baixaram substancialmente - logo, as concentrações de poluentes aumentaram. Isso tem permitido que diversos dos efluentes desse tipo de indústria tenham-se habilitado para serem depurados anaerobicamente.

Os tratamentos anaeróbicos são mais complexos que os aeróbicos, o que torna o processo um pouco mais lento e mais sensível a mudanças operacionais qualitativas e quantitativas.

A realidade dos fatos é que a digestão anaeróbica depende de quatro fases intimamente interligadas, o que significa necessidade de mais atenção, mais controles e maiores dificuldades para gerenciar para atingimento dos resultados desejados.

Inicialmente, as moléculas maiores são fragmentadas e transformadas em moléculas mais simples (ácidos orgânicos voláteis) e só depois é que essas moléculas serão convertidas em metano e gás carbônico. A metanogênese é a fase final, sendo mais lenta e mais exigente que as fases anteriores.

Sendo mais rápida a formação de ácidos, existe sempre o perigo de que se formem demasiadas quantidades de ácidos e que a metanogênese não dê conta de processá-los a tempo. Se isso acontecer, o pH pode cair a níveis críticos e colocar em risco a sobrevivência das colônias de microrganismos que atuam na metanogênese. Valores de pH abaixo de 5 podem aniquilar praticamente todos os microrganismos metanogênicos. Pode-se então tomar semanas para o restabelecimento do nível requerido de microrganismos metanogênicos. Logo, a metanogênese é o fator crítico e limitante do processo todo.

Outro fator perturbador é que os microrganismos anaeróbicos são bem mais sensíveis a compostos tóxicos e a agentes inibidores de metabolismo e de crescimento microbiológico. Entretanto, esse ponto tem sido muito bem trabalhado com a seleção de organismos mais tolerantes e mais resistentes a esses agentes.

A especialização das colônias de microrganismos é feita por seleção genética, mutações e engenharia genética, adaptações aos substratos específicos e competições entre organismos.

Com isso, o processo anaeróbico tem sido adotado com sucesso em tipos de tratamentos que há poucos anos atrás eram quase que impossíveis de serem realizados, tais como:

- ↗ Desalogenação de compostos organoclorados;
- ↗ Degradação de compostos com mais altos níveis de recalcitrância (derivados de lignina, polifenóis, etc.);
- ↗ Faixas mais amplas de atuação em termos de pH's, temperaturas, presença de ácidos orgânicos voláteis, inibidores, compostos tóxicos, etc.

Paralelamente a esse melhor desempenho, tem-se conseguido quantidades e concentrações de metano no biogás que são cada vez mais próximas dos valores estequiométricos.

Costuma-se dizer que qualquer efluente que seja tratável por processos aeróbicos pode ser tratado também anaerobicamente. Entretanto, a velocidade de tratabilidade pode variar, já que o processo anaeróbico é mais vagaroso para tratar compostos de maior recalcitrância, como fragmentos mais longos e condensados de lignina.

Por outro lado, os tratamentos anaeróbicos mostram uma vantagem inquestionável em relação aos aeróbicos: a digestão

anaeróbica pode atuar tanto sobre materiais orgânicos solubilizados no efluente, como também sobre sólidos suspensos de natureza orgânica, desde que de dimensões reduzidas (fragmentos de fibras, fibrilas, finos celulósicos, etc.).

Os reatores anaeróbicos são desenhados para incorporarem as quatro fases da digestão anaeróbica, mas eles costumam ser desenhados de forma a terem dois estágios principais:

Primeiro estágio: Produção de AOV's – Ácidos Orgânicos Voláteis

Nessa etapa atuam tanto as bactérias hidrolíticas como as formadoras de ácidos orgânicos voláteis. As moléculas mais complexas de ceras, gorduras, proteínas, lignina, carboidratos vão sendo hidrolisadas e metabolizadas enzimaticamente por ação dos microrganismos. A maior parte das moléculas acaba se convertendo em ácidos orgânicos simples e em gás carbônico. Esses AOV's serão as matérias-primas para a etapa seguinte, que é a metanogênese.

Segundo estágio: Produção de metano e gás carbônico (biogás)

Nessa etapa, os ácidos orgânicos voláteis serão convertidos em biogás, uma rica mistura de metano e gás carbônico, que pode também conter eventualmente: nitrogênio, amônia, hidrogênio e gás sulfídrico. O biogás também se apresenta como um gás rico em umidade, que precisa ser abatida para uso do gás como biocombustível.

Os microrganismos metanogênicos são estritamente anaeróbicos e se constituem de diversas espécies taxonômicas de bactérias, cada qual dando preferência a tipos mais específicos de alimentos, já que existem inúmeros compostos de AOV's que serão convertidos - inicialmente em acetatos e hidrogênio e depois em metano e gás carbônico.

Essa etapa depende de inúmeros fatores importantes, que se associam entre si para tornar a metanogênese como um processo que demanda atenção e controle.

A formação do metano é gradual, sendo que a velocidade do processo depende tanto dos tipos de AOV's disponibilizados, como da especificidade e efetividade da colônia para os mesmos.

O processo demora certo tempo para se tornar estável e os ajustes iniciais dependem de muita sensibilidade dos operadores. Os

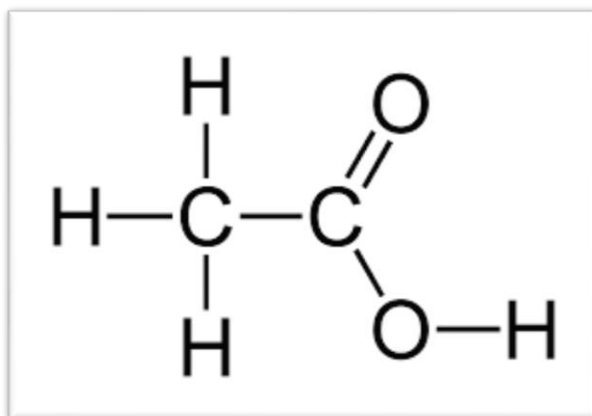
microrganismos precisam colonizar o reator de forma associada e integrada para que os dois estágios ocorram harmoniosamente.

A digestão anaeróbica só se encerra quando se produz o metano nas quantidades desejadas e esse metano é liberado e removido do sistema. Em caso de não haver formação de metano suficiente, a grande quantidade de ácidos orgânicos voláteis continuará resultando em valores altos de DQO, bem como os valores de DBO podem inclusive serem mais altos do que no efluente original. Isso se deve ao fato que moléculas orgânicas de difícil degradabilidade e que não eram medidas como DBO podem ter sido degradadas e convertidas em AOV's, que passam dessa forma a fazer parte da DBO.

Caso o metano não seja formado nas velocidades e quantidades que deveria ser, acumulam-se ácidos orgânicos, principalmente o ácido acético e o gás carbônico no líquido. O efluente se acidifica e a população microbiológica pode entrar em colapso.

As estabilizações dos ciclos microbiológicos e dos rendimentos dos processos se conseguem pelo exato equilíbrio dessa microbiologia ativa, dinâmica e complexa. Isso se consegue monitorar através de dois testes simples: produção de ácidos orgânicos voláteis (etapa de produção de ácidos) e produção de metano (etapa da metanogênese).

Os ácidos orgânicos voláteis são ácidos orgânicos de cadeia curta, sendo o principal deles o ácido acético, mas também ocorrem outros: ácidos fórmico, propiônico, butírico, valérico e caproico. Esses ácidos são produtos intermediários que consistem na base alimentícia das bactérias da etapa metanogênica. Eles são, por isso mesmo, considerados como matérias-primas para a formação do metano.



Ácido acético

Quando as bactérias metanogênicas não estão com bom desempenho, os ácidos não são utilizados na mesma velocidade com que estão sendo gerados e se acumulam, acidificando o meio. As mudanças no pH, na alcalinidade bicarbonato e na produção de metano indicam que o sistema está em desequilíbrio. Uma análise dos tipos de ácidos predominantes pode dar indicações sobre quais bactérias metanogênicas estão em falta e sem cumprir seu papel. Também se podem ter orientações sobre o que está acontecendo com as bactérias acidogênicas, que também podem estar em desequilíbrio.

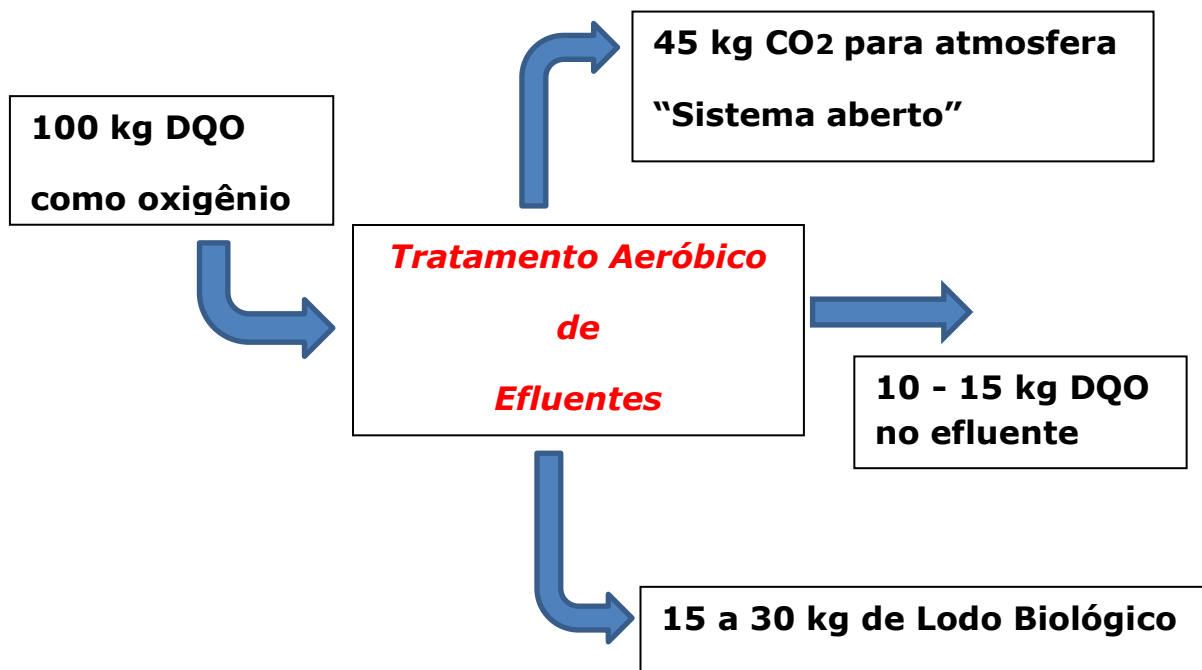
A conversão dos ácidos orgânicos livres ou voláteis em metano é uma das principais rotas bioquímicas da natureza. Ela completa o processo anaeróbico e oferece indicações de como esse processo biotecnológico está ocorrendo. A grande vantagem social dessa conversão é que o metano é um gás combustível que pode ser aproveitado pelo ser humano para geração de energia. Já a grande perversidade ambiental, é que o metano não for utilizado e for lançado para a atmosfera, ele está colaborando para o avanço do efeito estufa, já que é um dos principais gases de efeito estufa (GHG – “Green House Gases”).

Já sabemos que existem duas rotas principais de formação do metano:

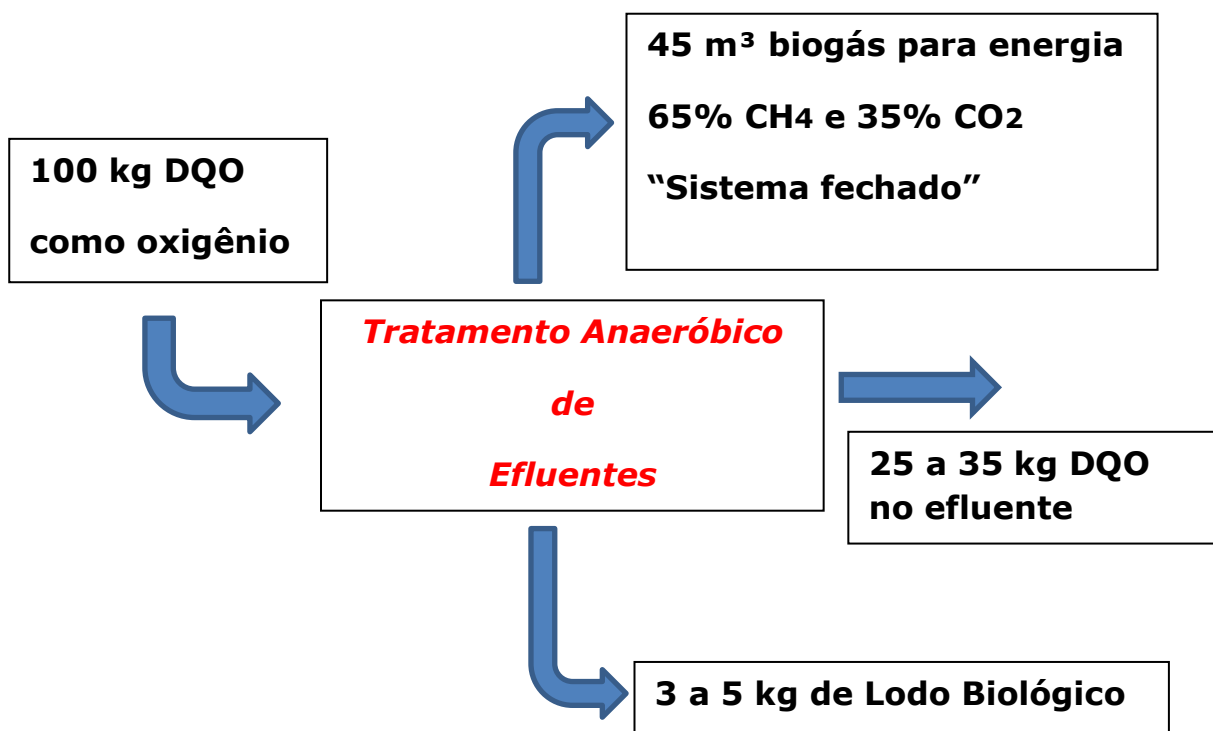
- A primeira através da clivagem direta do ácido acético (ou acetato) em metano e gás carbônico. Nesse caso, o ácido acético é a principal fonte de suprimento das bactérias metanogênicas, sendo a principal rota de formação do metano em processos anaeróbicos.
- Outra parte do metano se forma graças à reação do CO₂ (ácido carbônico) com o hidrogênio.

Sempre existe grande disponibilidade de gás carbônico nos processos anaeróbicos, logo esse gás sempre estará à disposição e nunca será fator limitante como matéria-prima nesses processos.

Como as rotas de formação do metano são variadas e interdependentes, elas precisam estar em sintonia e equilibradas para evitar que produtos intermediários se acumulem ou faltem. As principais colônias de microrganismos devem ser avaliadas e estimuladas.



versus



Cerca de 70 a 90% da DBO (ou biomassa biodegradável) presentes no efluente ou nas partículas sólidas de material orgânico podem ser convertidos em biogás. O resultado sobraré como lodo

retirado ou como DBO não biodegradada no efluente tratado. Esses rendimentos são bem interessantes e alavancam a utilização dos processos anaeróbicos em diversas situações, pois o resíduo gerado como lodo em excesso é bem mais estável e em menores quantidades que nos processos aeróbicos.

O lodo anaeróbico é estável e pode ser encaminhado para utilização agrícola ou florestal. Nos processos aeróbicos, a maior parte da DBO do efluente é convertida em corpos de microrganismos (lodo biológico), enquanto nos processos anaeróbicos essa DBO é em sua maioria convertida em biogás (metano e gás carbônico).

Todo o processo anaeróbico ocorre preferencialmente em condições mesofílicas ou termofílicas, logo se trata de tratamento recomendado principalmente para efluentes quentes e para regiões tropicais ou subtropicais. Às vezes, os reatores podem ter sistemas de aquecimento e outras vezes, costumam ser construídos enterrados no solo para garantir maiores estabilidades na temperatura. Esses casos são comuns em regiões mais frias e com amplitudes maiores de temperaturas.

As baixas temperaturas e muito baixas concentrações de DBO podem limitar a produção de metano para utilização comercial. As temperaturas mais indicadas são aquelas acima de 30°C e as DBO's devem preferencialmente estar acima de 1.000 ppm, mas isso não significa que não possam ser válidos valores abaixo desses.

As concentrações mais diluídas impactam tanto na produção de metano como também na dimensão do reator anaeróbico, já que o tempo de residência nesses reatores pode ser elevado, variando de horas a dias, conforme a concepção do reator.

Costuma-se dividir os efluentes em termos de sua concentração em DQO e da relação DBO/DQO (biodegradabilidade):

- *Efluentes com carga orgânica alta*: maiores que 5.000 ppm DQO
- *Efluentes com carga orgânica média*: 1.000 a 5.000 ppm DQO
- *Efluentes com carga orgânica baixa*: 400 - 1.000 ppm DQO
- *Efluentes com fácil biodegradabilidade*: $DBO/DQO \geq 0,7$
- *Efluentes com biodegradabilidade média*: $DBO/DQO \rightarrow 0,3$ a $0,7$
- *Efluentes com alta recalcitrância*: $DBO/DQO \leq 0,3$

Quanto maior a relação DBO/DQO, maior é a aptidão de um efluente para ser tratado por meios anaeróbicos e com altas taxas de remoção de DBO e de DQO.

Apesar de esses conhecimentos sobre biodegradabilidade serem indicadores simples e fáceis de avaliar, poucos são os autores e técnicos que se preocupam com algumas questões fundamentais que levantaremos a seguir:

Questão 01: Os testes de DBO são realizados em condições aeróbicas e medem o consumo de oxigênio para se biodegradar a matéria orgânica do efluente por microrganismos aeróbicos.

Questão 02: Os testes de DBO são muito pouco eficientes para indicar valores para materiais particulados presentes como sólidos suspensos orgânicos (SSV) nos efluentes, pois o tempo de permanência no teste e a microbiologia usada não são suficientes para realizar essa biodegradação. No caso de efluentes de fábricas de celulose e papel são comuns partículas representando altos teores de SSV como fibras, fibrilas, células de microrganismos, etc.

Questão 03: O teste de DQO consiste em uma oxidação química rápida e drástica, usando um oxidante forte (dicromato de potássio) em condições muito ácidas. Com isso, a DQO mede praticamente toda a matéria orgânica passível de oxidação, seja a biodegradável como a recalcitrante, seja a diluída como a suspensa na forma de sólidos. A medição de DQO também inclui compostos inorgânicos que se modifiquem e que consumam do oxidante nas condições do teste.

Em função disso, sempre considero importante que as avaliações de DBO e DQO sejam realizadas tanto em efluentes filtrados como em efluentes sem filtrar, para separar e para conhecer os efeitos dos sólidos suspensos voláteis nos resultados. Também é importante se analisar o teor de SST (Sólidos Suspensos Totais) e de SSV (Sólidos Suspensos Voláteis), para se conhecer qual a proporção de biomassa orgânica presente nos sólidos do efluente.

A partir desses valores se poderão tomar decisões melhores por se disporem de maiores informações sobre a biodegradabilidade das diversas frações do efluente a ser tratado em condições anaeróbicas. E aeróbicas também, pois isso também é muito válido para outros tipos de tratamento de efluentes.

Com base nessas avaliações simples e relativamente pouco comuns para interpretações nos laboratórios das estações de tratamento de efluentes, torna-se possível entender de forma muito mais adequada o potencial de biodegradação, e com isso, se explicar melhor as causas de eficiências ou de ineficiências do tratamento.

Por exemplo, muitas vezes a baixa relação DBO/DQO determinada em efluentes sem filtração se deve exclusivamente ao alto conteúdo de SSV presentes no efluente. Bastaria se filtrar ou decantar esse efluente na ETE para tornar esse efluente em um material muito mais biodegradável, com mais alta relação DBO/DQO. Portanto, toda vez que se encontrarem relações DBO/DQO abaixo de 0,3 - suspeitem do teor de SSV no efluente e questionem como foi feito o teste.

Também é interessante se relacionar os valores de DBO e DQO do efluente com os dois testes relacionados anteriormente nesse capítulo: AME – Atividade Metanogênica Específica e BMP – “Biochemical Methane Potential”.

Com essas ferramentas e dados à mão, ficará muito mais fácil projetar, planejar e operar com sucesso o tratamento anaeróbico de qualquer efluente onde se pretenda fazer isso por esse procedimento biotecnológico.



Bactérias – os microrganismos preferenciais na anaerobiose
Fonte: <http://www.portaleducacao.com.br/Artigo/Imprimir/40834>

Agora que já conhecemos um pouco mais dos conceitos e das intimidades da digestão anaeróbica, já se torna possível enunciar um conjunto de vantagens que ela pode apresentar. Essas vantagens poderão alavancar e alicerçar decisões para que a digestão anaeróbica possa entusiasmar mais os técnicos do setor de celulose e papel.

Dentre as inúmeras vantagens dos processos anaeróbicos, destacam as seguintes:

- Baixa demanda energética pela menor necessidade de bombeamentos, recirculações e principalmente, pela inexistência de aeradores, ou de produção de oxigênio. Costumam-se encontrar referências de uso energético para esse tipo de tratamento que variam entre 0,1 a 0,15 kWh/m³ de efluente. Já para estações por tratamento aeróbico esses valores podem chegar a 0,30 a 0,45 kWh/m³.
- Geração de muito menor quantidade de lodo em excesso a ser removido do processo. Isso porque a DQO é convertida preferencialmente em metano e gás carbônico e não em corpos de microrganismos. A geração de lodo em excesso pelos processos anaeróbicos costuma ser de 1/3 a 1/10 da geração de lodo biológico de tratamentos aeróbicos por cada unidade de DQO removida do efluente. Como a geração e manuseio de lodo é um dos maiores custos nas ETE's, essa é sem dúvidas uma vantagem interessante.
- O lodo gerado nos processos anaeróbicos já se encontra estabilizado e pronto para utilização como biofertilizante (caso seja adequado). O lodo aeróbico é cru, constituído de milhões de células de microrganismos que precisam de uma compostagem subsequente para se tornar material orgânico estabilizado (húmus).
- O lodo anaeróbico mostra em geral mais fácil desaguamento que o aeróbico, comportando relativamente bem em prensas e em centrífugas.
- O processo anaeróbico gera quantidades importantes de um biocombustível valioso que é o biogás. O biogás contém entre 45 a 70% de metano em sua composição, sendo que essa é a sua fração combustível. O metano é um gás leve e que apresenta bom poder calorífico. O poder calorífico do biogás (mistura de metano e gás carbônico) conforme gerado não é elevado. Variará conforme o teor de metano e umidade, sendo relatados valores entre 15.800 a 23.400 MJ/Nm³. O MME – Ministério de Minas e Energia do Brasil costuma referir-se a um valor médio de 19.800 MJ/m³ para esse gás. Em outras unidades de energia, relatam-se poderes caloríficos para o biogás entre 4.600 a 5.600 kcal/Nm³.

- O processo anaeróbico pode produzir também gás sulfídrico (H₂S), sendo que esse gás pode ser separado e reincorporado ao processo em fábricas de celulose kraft e sulfito, reduzindo assim as perdas dessa matéria-prima processual.
- Os processos anaeróbicos possibilitam a decomposição tanto de material orgânico solúvel como de partículas orgânicas de pequenas dimensões, presentes como SSV no efluente.
- Os processos anaeróbicos atuam sobre efluentes altamente contaminados em carga de DQO e DBO, sem necessidade de diluições. Essa particularidade oferece condições de serem tratados efluentes com concentrações de DQO entre 20.000 a 50.000 ppm (20 a 50 kg/m³).
- Os processos anaeróbicos possibilitam a recuperação de águas tratadas pela fábrica, colaborando para fechamento dos circuitos internos.
- Os processos anaeróbicos podem atuar como “sistemas kidney”, possibilitando tratar efluentes de baixo fluxo e altas concentrações em matéria orgânica.
- A demanda de nutrientes na anaerobiose (Nitrogênio e Fósforo) é muito mais baixa que nos processos aeróbicos. A relação DQO:N:P é usualmente 100:5:1 em processos aeróbicos e 350:5:1 em anaeróbicos.
- Os processos anaeróbicos possuem baixa geração de odor, pois são realizados em reatores que precisam ser herméticos.
- O lodo anaeróbico tem alta capacidade de permanecer “adormecido” por longos períodos de tempo (até um ano ou mais) sem adição de nada durante esse período. Para trazê-lo de volta à ativa são necessários pouquíssimos dias (2 a 3).
- As instalações dos processos anaeróbicos são compactas e usam pouco espaço.
- As tecnologias anaeróbicas são comprovadas e existem diversos fornecedores com credibilidade e qualificação técnica, sendo que alguns estão relacionados na seção de referências da literatura.
- O custo de remoção de cada unidade de DQO do efluente sendo tratado pode ser bem menor (3 a 5 vezes) do que aquele

praticado em processos aeróbicos. Isso se deve às menores demandas de energia e nutrientes e à menor geração de excesso de lodo.

- Os processos anaeróbicos permitem desalogenar compostos organoclorados de baixo peso molecular, colaborando para redução das concentrações de AOX e da ecotoxicidade nos efluentes assim tratados.

Entretanto, nem só de vantagens e glórias vivem os processos anaeróbicos – se assim fosse, esses processos seriam os dominantes e não os processos aeróbicos no setor de celulose e papel. Existem algumas fraquezas nesses processos e eles precisam também ser conhecidos:

- Dificilmente se conseguem atingir níveis de DBO e DQO tão baixos nos efluentes tratados anaerobicamente como aqueles atingidos nos processos aeróbicos. Em geral, os processos anaeróbicos acabam por demandar um tratamento aeróbico ou um de oxidação química (ozônio, por exemplo) para polimento final do tratamento. Isso se torna necessário quando as especificações legisladas são restritivas para o empreendimento em questão.
- Os processos anaeróbicos mostram maior sensibilidade às variações da qualidade e fluxos dos efluentes, destacando as flutuações em: carga orgânica, temperatura e pH. Por isso mesmo, exigem controles mais sofisticados e níveis de operações mais estáveis.
- Os processos anaeróbicos são menos tolerantes a compostos tóxicos e afetados por substâncias inibidoras que afetam o desenvolvimento microbiológico das colônias responsáveis pela acidogênese e metanogênese.
- Os processos anaeróbicos são mais lentos para se equilibrar o sistema, tomando mais tempo para operação estável após rearranques da unidade.
- Os processos anaeróbicos têm mais dificuldades para degradar compostos recalcitrantes nos curtos espaços de tempo de residência nos reatores. Fragmentos pesados de lignina e compostos organoclorados de alto peso molecular são difíceis de serem degradados e acabam sobrando sem sofrer biodigestão, ou com degradação apenas parcial.

- Apesar de possível ser, o tratamento anaeróbico não mostra tanto potencial para efluentes muito diluídos (baixas concentrações e altos fluxos), em função do dimensionamento maior das estações de tratamento. Isso em função das mais altas relações de volumes requeridos por tonelada de DQO a remover.
- A microbiologia dos processos anaeróbicos é muito mais lenta e sensível do que a dos processos aeróbicos por lodo ativado. Isso se deve ao fato de que a digestão anaeróbica ocorre em diversas etapas e cada etapa depende de colônias específicas de microrganismos. Essas colônias atuam de forma associada e cada uma colabora ou é dependente do sucesso e da atuação de outras colônias.
- As condições anaeróbicas são propícias à formação de alguns compostos inadequados se liberados para a atmosfera: gás sulfídrico (H_2S), mercaptanas, aldeídos, amônia (NH_3), etc. Por essa e outras razões, exigem condições de plena estanqueidade nos reatores.

O somatório de vantagens e desvantagens tem resultado na adoção de sistemas híbridos, com um tratamento inicial de efluentes mais contaminados pelo processo anaeróbico, seguindo-se um processo aeróbico para o efluente desse tratamento em mistura a outros efluentes de baixa carga orgânica. Os processos híbridos em geral englobam um pré-tratamento anaeróbico e um tratamento final de polimento aeróbico. Esse processo aeróbico pode ser por lodo ativado, lagoas aeradas ou filtros aeróbicos.

As grandes reduções da DBO e da DQO que se atingem na digestão anaeróbica reduzem substancialmente as necessidades de aeração e nutrientes do tratamento aeróbico subsequente. Também a geração de lodo a dispor será bem menor. Consequentemente, muitos estudos e aplicações industriais têm demonstrado a viabilidade de sistemas híbridos, tendo a digestão anaeróbica a missão de degradar as porções mais contaminadas geradas na planta industrial.

A qualidade da água tratada por meios anaeróbicos em fábricas de papel reciclado e papelão tem inclusive permitido a recuperação dessa água de novo no processo fabril.

Outro fator que desperta interesse em fábricas de pequeno e médio porte e que são dependentes de geração de calor ou eletricidade é a produção de metano pela digestão anaeróbica. O metano pode ser gerado tanto pela compostagem de lodos como em tratamentos de efluentes.



Chama do biogás

As taxas de geração de metano mais comumente relatadas pela aplicação de procedimentos anaeróbicos são as seguintes:

0,15 a 0,35 m³ metano às CNTP/kg de DQO removida

0,15 a 0,35 m³ metano às CNTP/kg de SSV degradados de biomassa

CNTP = Condições Normais de Temperatura e Pressão

Em geral, o metano corresponde a 2/3 do total do volume do biogás seco produzido nas CNTP, logo a produção total de biogás varia como:

0,225 a 0,45 m³ biogás às CNTP/kg de DQO removida

0,225 a 0,45 m³ biogás às CNTP/kg de SSV degradados de biomassa



Quanto menor for a produção de biogás pelo tratamento, menor será a produção de metano e menos interessante se tornará o

processo para alguns empreendimentos. A produção de metano tem um valor estequiométrico esperado ($0,35 \text{ m}^3 \text{ CNTP/kg}$ biomassa removida), mas muitas ETE's por processos anaeróbicos não conseguem chegar próximo ao mesmo, seja por problemas na microbiologia, no desenho ou operação dos reatores ou pela qualidade instável do efluente sendo tratado.

Conhecendo a DQO do efluente e seu fluxo pode-se calcular a carga orgânica alimentada por dia ao reator. Já com os dados da BMP ("Biochemical Methane Potential"), pode-se criar uma relação direta entre a carga calculada de alimentação de DQO por dia ao tratamento e a quantidade potencial diária de produção de metano. Conhecendo esses potenciais de geração, os operadores poderão ficar mais atentos para descobrir eventuais fugas de conformidade da produção e trabalhar na correção das mesmas.

A produção de metano para uso interno em fábricas de papel e celulose de pequeno e médio porte pode ajudar a agregar competitividade às mesmas, ao mesmo tempo em que se resolvem problemas de natureza ambiental. São comuns os casos onde o metano gerado pode representar economias entre 10 a 20% na necessidade de compra de combustíveis dessas fábricas.

Por essa razão, toda atenção deve ser colocada sobre os fatores que regulam a geração de metano em quantidades próximas às estequiométricas, quais sejam:

- ↻ A capacidade de biodegradabilidade da matéria orgânica presente no efluente a tratar;
- ↻ A competência da microbiologia presente para desempenhar essa biodegradabilidade;
- ↻ A composição em carbono orgânico do material sendo tratado;
- ↻ O equilíbrio harmônico entre as etapas do processo anaeróbico;
- ↻ O tempo de biodigestão anaeróbica;
- ↻ A temperatura e o pH no reator;
- ↻ A nutrição balanceada dos microrganismos;
- ↻ O controle das altas concentrações de SSV (biomassa) no interior do reator para se dar maiores oportunidades de que o alimento (DQO) seja consumido pela biomassa microbiológica;

- ⇒ O contato máximo entre a biomassa de SSV no interior do reator e a matéria orgânica que deve ser biodegradada do efluente, seja na forma dissolvida ou como sólidos suspensos;
- ⇒ O controle das variáveis operacionais através sistemas seguros e confiáveis (automação, calibração de malhas críticas, conscientização e treinamento de operadores, apoio laboratorial qualificado, etc.).



Outro fato fundamental a ser sempre lembrado é o seguinte:

..... não adianta se operar bem e com altos rendimentos um sistema anaeróbico, se produzir metano próximo aos níveis estequiométricos e depois se liberar esse metano para a atmosfera por falta de uso do mesmo na instalação.

Isso é absolutamente incorreto porque o metano tem uma capacidade de geração de efeito estufa que é 21 vezes maior do que o do gás carbônico.

Da mesma forma que o biogás é um biocombustível natural e renovável, se ele não for usado para essa finalidade, ele se acumulará como potente poluente. Ou seja, conforme o lado que se colocar o metano, ou ele será herói ou perverso vilão ambiental.



FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DOS PROCESSOS ANAERÓBICOS



Já vimos anteriormente que a digestão anaeróbica é sensível e depende de uma série de controles operacionais e de monitoramento para que se alcancem os resultados dela esperados. Diversos são os fatores que necessitam de atenção e controles, sejam eles de condições típicas da operação, sejam das características do efluente (alimento ou substrato) a ser degradado.

Dentre os fatores operacionais se destacam os seguintes:

- ☞ Temperatura;
- ☞ Tempo de residência no reator;
- ☞ pH;
- ☞ Nutrientes para favorecimento do metabolismo microbiológico;
- ☞ Formação e presença de ácidos orgânicos voláteis;
- ☞ Produção de gás metano;
- ☞ Proporção de metano e gás carbônico no biogás;
- ☞ Concentração inicial e final da matéria orgânica que se quer biodeteriorar na forma de DQO e DBO;

☞ Geração de lodo em excesso;

☞ Etc.

Além desses fatores tipicamente operacionais, quantitativos e numéricos, a digestão anaeróbica necessita também de ações de qualidade operacional, que estão associadas à estabilidade das operações e do substrato a ser degradado. Flutuações do processo e alterações bruscas podem afetar os rendimentos, e em alguns casos, colocar em risco a vitalidade das colônias de microrganismos.

As seguintes alterações processuais devem ser evitadas ou minimizadas:

- ☐ Mudanças bruscas na carga orgânica que está sendo alimentada aos reatores (função das concentrações de DBO e/ou DQO e do fluxo de alimentação do efluente). Deve-se evitar exceder a capacidade hidráulica e de carga orgânica do reator em questão.
- ☐ Mudanças bruscas de temperatura;
- ☐ Mudanças bruscas de pH;
- ☐ Mudanças bruscas de condutividade;
- ☐ Choques de oxidantes (causados por residuais elevados de agentes oxidantes como dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, ozônio, etc.);
- ☐ Choques de redutores (residuais de ditionito ou hidrossulfito de sódio, ou de dióxido de enxofre, etc.);
- ☐ Choques de produtos tóxicos (metais pesados, biocidas, etc.);
- ☐ Choques de substâncias inibidoras (sulfatos, sulfetos, surfactantes, etc.);
- ☐ Choques causados pela entrada de oxigênio nos sistemas anaeróbicos. Há necessidade de uma perfeita estanqueidade no sistema, tanto para evitar perdas de metano, como para evitar entrada de oxigênio para o interior do reator. Como em geral existe uma pressão positiva no interior dos reatores devido à formação do biogás, a tendência mais usual é de perda de metano, ao invés de entrada de ar nos reatores.

- φ Choques causados por desbalanceamentos nutritivos, com falta ou excesso de nutrientes. Excesso de nitrogênio costuma acontecer mais no tratamento de esgotos sanitários.

Frente a tantas variáveis envolvidas, o ideal seria de discutir um pouco mais sobre cada uma delas, o que será feito a seguir:

✓ Temperatura

Existem três faixas de temperatura mais usuais para que se processe a digestão anaeróbica, cada uma delas representando microrganismos típicos e específicos.

As condições do reator e seu desempenho variam, conforme a faixa de temperatura com a qual se define trabalhar:

Digestão psicrófila: 15 a 25°C

Digestão mesófila: 25 a 45°C

Digestão termófila: 45 a 65°C

Os rendimentos, a taxa de degradação da matéria orgânica e a quantidade/qualidade de biogás formado são todos afetados pela temperatura.

Quanto maior for a temperatura, quanto mais especializados forem os microrganismos para atuação nessa temperatura, melhores são esperados os rendimentos e a qualidade do biogás. Também menor será a patogenicidade do efluente tratado em temperaturas mais altas.

As condições termofílicas podem ser as condições ideais para muitas empresas do setor de celulose e papel, principalmente pela grande geração de efluentes quentes: condensados de evaporação; efluentes da máquina de papel, do branqueamento de celulose, etc. Entretanto, quando o tempo de residência for muito longo, essa temperatura alta precisará ser mantida no interior do reator – isso poderá ser feito por reaquecimento de parte do efluente ou por recirculações internas no reator.

De uma maneira geral, a maioria das estações de tratamento de efluentes costuma tratar efluentes misturados e homogêneos em tanques ou lagoas de equalização de fluxos e de qualidade dos efluentes.

Em função das dificuldades de se manter condições termofílicas por longos períodos de tempo, a maior parte das estações anaeróbicas de tratar efluentes de celulose e papel trabalha com condições mesofílicas, nos limites mais altos para essa categoria (acima de 40°C).

Já para o caso de se utilizarem sistemas para tratamento de efluentes específicos em sistemas tipo "kidney", os sistemas termofílicos podem se constituir nas soluções mais indicadas.

✓ Tempo de residência

O tempo de residência do efluente no reator ou tempo de detenção hidráulico é resultante do desenho e do conceito dos reatores e das características do substrato.

O tempo depende da temperatura utilizada, presença de nutrientes, nível de especialização dos microrganismos e idade do lodo (indica indiretamente a relação entre biomassa de microrganismos no interior do reator e a quantidade de alimento a ser degradado como DQO no efluente).

São essas as razões que determinam que um reator não seja projetado apenas como se fosse uma máquina, mas sim como um biodigestor que precisa ser adequado ao efluente a ser tratado e à especialização dos microrganismos que realizarão o trabalho.

O objetivo sempre será de se terem ciclos mais rápidos, mas com excelentes valores de rendimento em remoção de DQO ou DBO e em produção e qualidade do biogás.

✓ Teor e quantidade de nutrientes

O teor de nutrientes no efluente é um dos principais requisitos para serem determinados antes de se iniciar o tratamento.

Com base nesse teor, nos fluxos de alimentação e nas demandas nutricionais dos microrganismos podem-se calcular as taxas de adição de nutrientes ao sistema (ureia, ácido fosfórico, ortofosfatos, etc.).

Um bom balanço nutricional se obtém quando a relação C/N for menor que 30 e a relação C/P for menor que 150.

As medições de N e de P não devem ser como totais desses elementos, pois muito do nitrogênio e do fósforo total não são prontamente metabolizáveis pelos microrganismos. Recomenda-se então determinar os conteúdos como N-amoniacal e P-ortofosfato, que são as formas mais facilmente assimiláveis pelos organismos.

✓ pH e teores de AOV' – Ácidos Orgânicos Voláteis

A faixa de pH ideal para a anaerobiose é muito estreita – entre 6,8 a 7,2, mas rotineiramente são aceitos valores em uma faixa um pouco mais ampla – 6,5 a 8.

O pH é afetado não apenas pelas características do efluente (substrato) como também pela formação de AOV's – Ácidos Orgânicos Voláteis na etapa de acidogênese.

Outro fator que colabora para diminuição do pH é a enorme geração de CO₂ no processo, que em meio aquoso se converte em ácido carbônico, um ácido fraco, mas que precisa de alguma base para ser neutralizado.

Sabe-se, dos estudos da digestão anaeróbica, que o grande problema do pH no reator não é na verdade o pH do efluente, mas sim das mudanças do pH em função da formação de gás carbônico e de AOV's. Se não houvesse excesso de AOV's, o pH da biodigestão anaeróbica poderia inclusive ocorrer em níveis ligeiramente mais baixos que 6,5.

O excesso de AOV's é sinal de desequilíbrio entre as duas etapas principais da digestão anaeróbica – a acidogênese e a metanogênese. É uma indicação de que a etapa da metanogênese não está conseguindo acompanhar a produção de AOV's da etapa anterior. Sabemos, pois já vimos anteriormente, que com excessiva formação de AOV's, o pH e a acidez do meio podem inviabilizar a vitalidade da colônia de microrganismos metanogênicos.

As concentrações usuais de AOV's costumam variar entre 1.000 a 3.000 ppm, expressos como ácido acético, porém elas podem atingir valores bem maiores – acima de 8.000 ppm. Isso é uma clara evidência de que algo de mal pode estar acontecendo no sistema.

O aumento de AOV's no reator pode estar associado às seguintes possíveis causas:

- Sobrecarga orgânica (aumento brusco na alimentação de DQO no reator);
- Sobrecarga hidráulica (aumento brusco na vazão do efluente, que conduz como consequência a uma elevação da carga orgânica a ser tratada);
- Desequilíbrio operacional, como consequência de variações da concentração de SSV (biomassa microbológica) no interior do reator;
- Desequilíbrios nutricionais;
- Sobrecarga tóxica aos microrganismos metanogênicos, que são menos tolerantes a isso do que os acidogênicos;
- Choques de pH, temperatura, oxidantes, redutores, etc.

Quando o teor de AOV's começa a aumentar no processo, esses ácidos consomem mais do bicarbonato presente, que se chama alcalinidade bicarbonato do sistema. O bicarbonato ocorre em pH's ligeiramente abaixo da neutralidade - ao estar presente, acaba tamponando a queda do pH causada pela formação de ácidos orgânicos voláteis. Caso o pH cair abaixo de 6, significa que a alcalinidade bicarbonato se perdeu e a queda de pH passa a ser mais rápida.

Para evitar que isso aconteça, deve-se monitorar e corrigir a alcalinidade bicarbonato do sistema. Isso se consegue adicionando cal hidratada ou soda cáustica em pequenas quantidades. Tanto a cal hidratada como a soda cáustica reage com a acidez e em primeiro lugar se formam bicarbonatos. Quando o pH sobe demais, esse bicarbonato se converte em carbonato. No caso de se usar cal, o carbonato de cálcio formado se precipita e se torna inerte. No caso de se usar soda cáustica, o carbonato de sódio é solúvel e não forma partículas sólidas que possam perturbar o sistema.

Os bicarbonatos não mudam o pH para cima, porém, quando eles desaparecem do meio, não haverá nada mais para impedir a queda do pH.

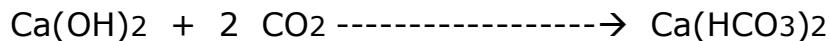
O controle da concentração de AOV's e da alcalinidade bicarbonato se consegue por medição titulométricas simples,

através de pontos finais de viragem de alguns indicadores específicos ou através de potenciometria com eletrodos combinados.

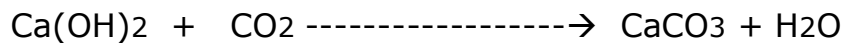
O bicarbonato de sódio é bem mais eficiente para promover ajustes de pH's, mas é menos utilizado devido ao maior preço da soda cáustica. O bicarbonato de sódio não é tóxico, não se precipita e não causa problemas dentro do reator.

A cal viva ou a cal hidratada são os meios mais tradicionais de se adicionar alcalinidade bicarbonato nos reatores anaeróbicos. Esses compostos deverão ter boa solubilidade para que se possa formar bicarbonato em condições de ligeira acidez e em presença de gás carbônico no meio (que é o caso de reatores anaeróbicos).

No caso da cal hidratada acontece o seguinte:



Caso ocorra um excesso grande de gás carbônico no meio, o bicarbonato não é formado e se forma carbonato de cálcio que se precipita. Isso acontece quando o pH está abaixo de 6. Pode acontecer também quando a quantidade de cal hidratada (ou de íons hidroxilas) for sobredosada.



Portanto amigos, não se trata apenas de se controlar o pH do efluente ou do reator, mas também de monitorar e corrigir o excesso de gás carbônico e os teores de bicarbonatos. Valores considerados desejáveis de alcalinidade bicarbonato nos efluentes a tratar por processos anaeróbicos estão situados entre 1.500 a 2.500 ppm, expressos como CaCO₃.

As fábricas de celulose kraft costumam utilizar alguns de seus resíduos sólidos alcalinos para ajustar o pH no reator. Os resíduos mais indicados para isso seriam: cal virgem queimada purgada do forno de cal e mistura de "dregs+grits". Esse último resíduo tem ainda a capacidade de fornecer alguns micronutrientes importantes para o adequado desempenho do metabolismo microbológico.

Sabe-se também que em pH's ligeiramente acima de 8 se pode melhorar a granulação dos flocos de biomassa microbológica no interior de reatores UASB, dando à manta de lodo um melhor desempenho na sua "flutuação" no meio. Esse fato pode ser interessante para efluentes de fábrica de celulose sulfito

neutro, onde o pH do efluente já está naturalmente na faixa do ligeiramente alcalino.

✓ Características do efluente ou substrato

As características do substrato ou efluente são tão marcantes que acabam abrindo somente elas um novo tópico de discussão nessa seção sobre fatores a afetar a digestão anaeróbica. Estaremos assim, lhes trazendo as principais características, algumas já debatidas, mas que precisam e devem ser lembradas, por sua vital importância.

Repetindo, por substrato entenda-se o meio que serve de alimento para os microrganismos, que pode ser um efluente rico em alimento metabolizável (matéria orgânica), um resíduo sólido de natureza orgânica, etc.

São elas as seguintes:

- A. Concentração do poluente em termos de substâncias orgânicas biodegradáveis (DBO);
- B. Grau de biodegradabilidade dos materiais orgânicos presentes nas formas solubilizadas no efluente e em suspensão como sólidos suspensos no mesmo.
- C. Biodegradabilidade e recalcitrância relatadas pela relação DBO/DQO;
- D. Estado da matéria orgânica, que pode estar na forma solubilizada ou na forma de grânulos ou de partículas de SST (Sólidos Suspensos Totais), os quais podem ser também caracterizados como SSV (Sólidos Suspensos Voláteis ou Orgânicos). A matéria orgânica solubilizada e diluída no efluente é de muito mais fácil degradabilidade e acessibilidade nos reatores anaeróbicos.
- E. Granulometria das partículas sólidas e suspensas no corpo do efluente; que se relaciona diretamente com a maior ou menor superfície das partículas para tomarem contato com os microrganismos. A matéria orgânica sólida pode requerer um fracionamento prévio para ser desintegrada em partículas menores.

As menores partículas têm maiores áreas superficiais e não afundam pela ação do seu peso no interior dos reatores.

- F. Teores de nutrientes no efluente (N-amoniaco e P-ortofosfato);
- G. Capacidade de tamponamento de pH do efluente, medida pelo seu pH, teor de gás carbônico e conteúdo de alcalinidade bicarbonato.
- H. Capacidade de produção de metano, medida pela BMP – “Biochemical Methane Potential”.
- I. Temperaturas compatíveis no efluente com as condições a serem usadas no tratamento. Efluentes relativamente quentes (45 a 75°C) são os mais interessantes, pois não demandam aquecimento para ajustes nos reatores. Lembrar sempre que não é a temperatura do efluente que é crítica, mas a temperatura dentro do reator. Essa temperatura pode ser equilibrada por aquecimento, resfriamento ou recirculação e mistura de efluentes.
- J. Teores de compostos considerados tóxicos ou inibidores da digestão anaeróbica (organoclorados, metais pesados, gás sulfídrico, íons oxidados, íons alcalino e alcalinos terrosos, etc.).

Toxicidade de materiais presentes no substrato ou no efluente

A toxicidade do efluente é um dos principais fatores a se avaliar para o bom desempenho dos processos anaeróbicos. O efluente pode trazer produtos tóxicos agregados à sua composição orgânica (organoclorados) ou então como contaminantes (surfactantes, metais pesados e biocidas).

O problema maior é que a toxicidade pode acontecer esporadicamente, dependendo de mudanças de condições operacionais – por exemplo: introdução de um novo reagente químico; ou aumento de carga com aumento de residual de algum oxidante.

A condição vital para que ocorra toxicidade em um efluente é que o composto tóxico esteja dissolvido no mesmo. Se esse composto não estiver solubilizado, mas sim na forma sólida, ele se decantará e irá para o fundo do meio, sem interferir no processo, pois é insolúvel.

A toxicidade também é algo bastante seletivo, pois algum composto pode ser estimulante de crescimento e favorável ao desenvolvimento biológico em uma determinada concentração para um organismo e nessa mesma concentração pode ser tóxico a outros organismos. Além disso, um mesmo organismo pode ter seu crescimento estimulado por baixas concentrações de íons alcalinos e alcalinos terrosos, por exemplo, e em altas concentrações desses íons, ter seu crescimento inibido. Por exemplo, os íons sódio e potássio estimulam o crescimento de bactérias anaeróbicas em concentrações de 100 a 200 ppm, mas são tóxicos às mesmas bactérias em concentrações acima de 3.000 ppm.

O principal problema da toxicidade é que ela tem ação imediata e muitas vezes irreversível, provocando grandes estragos na microbiologia dos tratamentos. Isso acontece em casos de choques de toxicidade. Por outro lado, se o nível de toxicidade for aumentando vagarosamente em um sistema, os microrganismos podem ir se adaptando a essa situação por seleção natural (morrem os sensíveis e essa morte abre espaço para crescimento dos organismos tolerantes).

Outro fator interessante nos estudos de toxicidade é a presença de antagonismos e sinergias. O antagonismo consiste em se combater o efeito tóxico de uma substância com a adição de outra. Já a sinergia significa que uma substância potencializa o efeito tóxico de outra. Por exemplo: dois compostos tóxicos podem cada um deles estar abaixo de seus limites de toxicidade, mas quando juntos, potencializam os efeitos e deixam tóxico o meio.

A toxicidade em tratamentos de efluentes por meio anaeróbico costuma ser monitorada de duas maneiras:

- Pela produção menor de metano, que tem resposta muito rápida quando existe toxicidade no meio;
- Pelo desequilíbrio na produção e consumo dos ácidos orgânicos voláteis. Caso a concentração dos AOV's começar a crescer e a acabar com a alcalinidade bicarbonato que tampona o meio, isso pode representar presença de algum composto tóxico ou inibidor – nesse caso para os microrganismos metanogênicos.

Os principais compostos tóxicos ou inibidores ao metabolismo de microrganismos anaeróbicos são os seguintes:

- ⊗ Compostos oxidantes (peróxido de hidrogênio, ozônio e dióxido de cloro);
- ⊗ Compostos redutores (dióxido de enxofre e ditionitos ou hidrossulfitos);
- ⊗ Metais pesados (zinco, mercúrio, arsênico, cromo, níquel, etc.);
- ⊗ Íon cianeto;
- ⊗ Compostos orgânicos clorados recalcitrantes à desalogenação por processos anaeróbicos;
- ⊗ Compostos orgânicos tóxicos (resinas, polifenóis, formaldeído, etc.);
- ⊗ Oxigênio molecular (traços de oxigênio são problemáticos mais para a metanogênese, pois as bactérias que produzem metano são estritamente anaeróbicas). No caso das bactérias acidogênicas, existem microrganismos facultativos que podem consumir alguma presença de oxigênio no meio.
- ⊗ Íons oxidados em excesso (cloratos, sulfatos, nitratos, etc.);

A presença de sulfato em quantidades excessivas (como no caso de lodos terciários com residuais de sulfato de alumínio) promove o crescimento de bactérias sulforredutoras que podem competir com as bactérias fermentativas que promovem a acidogênese e a metanogênese. Com isso, a produção de gás sulfídrico (H_2S) aumenta e acaba se tornando um inibidor ao aumento da microbiologia desejável ao processo. Portanto, o excesso de sulfatos além de provocar uma maior competição por alimentos na população microbiológica, pode também afetar (por inibição do gás sulfídrico formado) o crescimento da população de organismos interessantes à metanogênese.

Outro fator inibidor é a formação excessiva de amônia (NH_3) pela redução do nitrato quando presente em altas quantidades no substrato.

- ⊗ Surfactantes, que afetam a tensão superficial do líquido, causam espumas e prejudicam o contato dos microrganismos com as moléculas de material orgânico, presentes no efluente.

- ⊗ Sequestrantes (EDTA e DTPA);
- ⊗ Solventes orgânicos;
- ⊗ Gás sulfídrico em proporções elevadas (acima de 2% de H₂S na composição do biogás já é considerado problemático);
- ⊗ Gás amônia (NH₃) em quantidades elevadas devido à conversão das altas concentrações de nitrato presentes no substrato;
- ⊗ Metais alcalinos e alcalinos terrosos (sódio, potássio, cálcio e magnésio), que podem atuar como estimulantes em baixas concentrações (até 200 a 300 ppm), mas como elementos tóxicos em concentrações acima de 2.000 ppm.
- ⊗ Biocidas

O controle da toxicidade ou de efeitos inibitórios de compostos problemáticos pode ser realizado através das seguintes formas de atuação:

- ✓ Por atuação direta no próprio processo gerador do efluente e do contaminante em questão. Exemplo 01: mudança no uso de um determinado biocida por enzimas para controle de limo em máquinas de papel. Exemplo 02: Mudança em uma sequência de branqueamento para ECF-Light, com menor adição de compostos clorados como oxidantes.
- ✓ Por diluição dos compostos tóxicos através ajustes e diluições de efluentes previamente ao tratamento anaeróbico. Isso pode ser feito em tanques ou lagoas de mistura e homogeneização, mas há necessidade de se conhecer e controlar muito bem os fluxos e as concentrações daquilo que se quer misturar para diluir.
- ✓ Pela remoção dos compostos tóxicos e inibidores via precipitação, adsorção em carvão ativado, complexação, etc.
- ✓ Pelo controle do equilíbrio entre produção e consumo de AOV's – Ácidos Orgânicos Voláteis ao longo das etapas da digestão anaeróbica.

- ✓ Pelo controle eficiente e eficaz da alcalinidade bicarbonato e do pH do meio de digestão.
- ✓ Pela especialização e seleção de colônias tolerantes de microrganismos.
- ✓ Pela antagonização do poder tóxico de uma substância adicionando um composto que possa ter efeito na diminuição desse efeito tóxico. Por exemplo: o sulfeto pode reagir com íons de metais pesados, formando sulfetos insolúveis que perdem a capacidade de serem tóxicos por não estarem mais em solução.
- ✓ Pelo gerenciamento da estabilidade qualitativa do efluente sendo tratado.
- ✓ Pela garantia da estabilidade operacional no reator de tratamento anaeróbico.
- ✓ Pelo controle adequado na formação de amônia e de gás sulfídrico, em geral associados a residuais altos de nitrato e de compostos de enxofre no efluente.

As principais variáveis de controle operacional que estão relacionadas a todos esses fatores e que afetam o desempenho da digestão anaeróbica são, portanto, as seguintes:

- pH – ideal entre 6,8 a 7,2 – mas pode variar entre 6,5 a 8
- Alcalinidade bicarbonato no reator - maior que 1.500 ppm, mas idealmente acima disso (por volta de 1.500 a 3.000 ppm, expressa como mg CaCO₃/Litro)
- Teor de gás carbônico (CO₂) no biogás – menor que 40% base volumétrica
- Produção de metano - a mais próxima possível dos valores estequiométricos – acima de 0,3 m³ metano CNTP/kg DQO removida
- Temperatura – de acordo com o tipo de seleção de faixa escolhida e dos microrganismos e reatores em uso.
- Teor de sulfeto no efluente – menor que 500 ppm

- Teores ideais de íons alcalinos e alcalinos terrosos (Sódio entre 100 a 200 ppm; Potássio entre 200 a 400 ppm; Cálcio entre 100 a 200 ppm e Magnésio entre 75 e 150 ppm)
- Teor de amônia (NH₃) – menor que 200 ppm
- Teor de gás sulfídrico (H₂S) – menor que 200 ppm

Como se pode notar, não se trata apenas de se dar a partida de um reator, alimentar o mesmo com efluente e ficar esperando as coisas acontecerem. Mesmo com sistemas automáticos de controle, a experiência e qualificação técnica dos operadores são fundamentais para o sucesso. Há que se entender muito bem a físico-química, a microbiologia, as condições intrínsecas e as inter-relações desse dinâmico processo biológico que é a digestão anaeróbica.



Reator anaeróbico – Cambará S.A.



TRATAMENTOS ANAERÓBICOS DE EFLUENTES



Estação de purificação de biogás
Fonte: Jordão, 2014

Os tratamentos de efluentes por processos anaeróbicos já são comuns em diversas instalações do setor industrial de produção de celulose e papel, embora sejam mais comuns em plantas de tratamento de esgotos municipais e de efluentes da indústria alimentícia. Para muitas empresas industriais da área química e de base florestal, o tratamento anaeróbico tem sido mais encarado como uma espécie de pré-tratamento para efluentes com altas concentrações orgânicas e eventualmente, com baixos fluxos. Com isso, e com instalações pequenas para efluentes de baixos fluxos e altas cargas orgânicas, as fábricas podem conseguir aperfeiçoar seus investimentos e custos de tratamentos na área de efluentes.

Dessa forma, as implantações de tratamentos anaeróbicos são muitas vezes comparadas a eficientes sistemas tipo "kidney", ou "rins purificadores", onde um sistema especialmente desenhado e projetado para um efluente setorial muito contaminado acabará reduzindo a contribuição poluente desse efluente e poderá ainda reduzir investimentos e custos gerais da ETE – Estação de Tratamento de Efluentes e da disposição de resíduos sólidos (lodos da ETE).

Com esse tipo de filosofia conceitual pode-se conseguir:

- ⇒ Redução do volume de lodo biológico;
- ⇒ Aumento na eficiência global de remoção de DBO e DQO;

- ⇒ Redução dos custos operacionais pelas menores necessidades de eletricidade, insumos, nutrientes, etc. Todos esses itens serão consumidos em menores quantidades por kg de DQO ou DBO removidas.
- ⇒ Potencial de produção e consumo interno de um biocombustível renovável que é o biogás.

Apesar de ser difícil se atender a parâmetros legais restritivos apenas com o uso de tratamento anaeróbico do efluente geral, os sistemas anaeróbicos podem ser associados e hibridados a sistemas aeróbicos ou oxidativos químicos, permitindo que as vantagens dos tratamentos anaeróbicos sejam compartilhadas no tratamento como um todo.

Os tratamentos anaeróbicos isoladamente são menos efetivos para redução da DQO, DBO, cor, turbidez e SST (Sólidos Suspensos Totais), porém, quando conjugados a outros tipos de tratamentos oferecem notáveis sinergias, especialmente em custos de investimentos e custos operacionais.

Etapas de tratamento anaeróbico têm sido também recomendadas para desgargamento de tratamentos aeróbicos de efluentes em condições de sobrecarga. O simples fato de se poderem separar fluxos de altas concentrações para tratar os mesmos anaerobicamente já pode oferecer vantagens qualitativas, quantitativas e econômicas para a ETE e para a empresa como um todo.

As grandes vantagens operacionais que os sistemas anaeróbicos oferecem são duas: podem receber efluentes muito mais aquecidos (até com 60 a 65°C) com o uso da digestão termofílica e podem receber efluentes com cargas orgânicas elevadíssimas, como até mesmo 40.000 ppm de DQO ou mais.

Com base nesses dados, outra alternativa que muitos cogitam é se pré-evaporar efluentes muito diluídos por sistemas de múltiplos efeitos. Com isso, eles se adequam para tratamentos anaeróbicos e se abrem espaços de fluxos e cargas para o tratamento em gargalo devido à sobrecarga.

A inclusão de etapas de tratamento anaeróbico em estações de efluentes industriais e até mesmo sanitário-urbanos e agrícolas depende muito do íntimo conhecimento das tecnologias e das particularidades desse tipo de processo biotecnológico. Só dessa forma se conseguirá integrá-lo com sucesso em estações de tratamento que já disponham de outros meios de tratar efluentes.

A seleção das tecnologias e processos de uma ETE implica em se terem avaliações seguras e qualificadas. Devem ser privilegiados parâmetros tais como:

- Eficiência na remoção de DQO, DBO, SST, SSV, turbidez, cor;
- Atendimento das exigências impostas pelo órgão de controle e licenciamento ambiental;
- Condições de estabilidade operacional e desempenho da unidade;
- Custos de investimentos, custos operacionais e custos de monitoramento;
- Necessidades energéticas;
- Demanda de insumos (nutrientes, oxigênio, polímeros, eletricidade, etc.);
- Necessidade e qualificação dos operadores;
- Necessidades de sistemas automáticos de controle da estação;
- Flexibilidades operacionais para ajustes em caso de mudanças na qualidade e fluxo de efluentes;
- Tolerância a choques e a mudanças bruscas nas operações;
- Geração de lodos e de matéria orgânica estabilizada;
- Geração de subprodutos valiosos (biogás, biofertilizante, água recuperada, gás sulfídrico recuperado, nutrientes recuperados, etc.);
- Necessidades de áreas construídas e de espaço geográfico total;
- Sensibilidade às condições climáticas (estações do ano, chuvas, etc.)
- Etc.

O principal objetivo dos sistemas de tratamento de efluentes por processos anaeróbicos é a redução do conteúdo de material orgânico, que costuma ser medido pelo rendimento de remoção de DBO ou de DQO, ou de ambos.

Essa digestão do material orgânico se trata de uma mudança do estado da matéria orgânica, que passa de compostos dissolvidos ou em suspensão no efluente para a forma gasosa (biogás), sobrando ainda um residual como DBO ou DQO não removidas no efluente tratado e um material extraído como excesso de lodo do processo.

As taxas de remoção de DBO ou de DQO podem variar entre 40 a 95%, com base no valor inicial desses parâmetros no efluente a ser tratado. Existem muitas variáveis afetando esses rendimentos, como já vimos anteriormente.

De uma maneira geral, esse rendimento é feito de maneira bem simples, apenas se baseando nas concentrações de DBO e DQO iniciais e finais do efluente.

Entretanto, já lhes contei sobre a importância de realizar esses testes com base em efluentes filtrados e não filtrados. Isso é vital, pois a biodegradabilidade da DBO e DQO dos SSV's é bem mais lenta e difícil do que aquela obtida em material orgânico solubilizado no efluente. Tendo em vista esse fato, podemos até mesmo termos valores excelentes para redução da DBO e DQO da fase solubilizada, mas péssimos para a fase na forma de SSV's no mesmo efluente. Por isso, a necessidade já relatada de se ter que entender e esclarecer muito bem essas formas de calcular rendimentos.

A DBO ou a DQO do efluente a ser tratado não medem diretamente a carga de material orgânico presente. Elas indicam, isso sim, o consumo de oxigênio necessário para a oxidação biológica (DBO) ou química (DQO) do material presente no efluente e que é passível de ser degradado nessas condições dos ensaios.

Com base nas concentrações de DBO e DQO e dos fluxos, torna-se possível se entender qual a quantidade de alimento orgânico que está sendo enviado para o sistema de tratamento de efluentes. Por alimento, entenda-se a quantidade de matéria orgânica sendo entregue aos organismos presentes nos reatores. Isso costuma ser expresso em termos de:

kg de DBO ou de DQO/dia

...sendo que, mais uma vez, reforço que tudo está expresso em termos de equivalência a oxigênio – mesmo se tratando de processos anaeróbicos.

Da mesma forma, é possível termos os fluxos e as concentrações de DBO e DQO do efluente tratado, o que permite se calcularem:

$$\frac{\text{kg de DBO ou de DQO residuais/dia}}{\text{kg de DBO ou de DQO removida/dia}}$$

A partir desses dados e de maneira muito simples, podem-se quantificar as taxas de remoção e de estabilização da matéria orgânica na ETE. Essa matéria orgânica foi transformada preferencialmente em biogás na digestão anaeróbica, sendo que o que mais interessa é sua conversão em metano.

Conhecida a quantidade de metano formada por dia e as cargas de DBO ou de DQO removidas, pode-se calcular um dos mais comuns e importantes de todos os indicadores de eficiência de um tratamento anaeróbico de efluentes, que é:

$$\text{m}^3 \text{ de metano a CNTP/kg de DBO ou DQO removidas}$$

...estequiometricamente, um valor próximo a 0,35 m³ de metano a CNTP/kg de DQO removida – mas que evidentemente depende do teor de carbono orgânico no conteúdo orgânico do efluente.

Uma das enormes vantagens já relatadas para os processos anaeróbicos é que a maior parte da DBO ou da DQO que entra nos reatores acaba se convertendo em biogás e muito pouco dela é extraída como lodo biológico em excesso. Como esse lodo tem idades elevadas, ele está praticamente estabilizado, não necessitando de etapas posteriores de compostagem.

A taxa de estabilização depende muito da constituição orgânica do efluente e da competência das colônias de microrganismos. Efluentes ricos em lignina, ceras, gorduras e proteínas costumam ser mais difíceis para biodigestão do que efluentes ricos em carboidratos e ácidos orgânicos voláteis. Entretanto, os carboidratos possuem menor conteúdo de carbono em suas moléculas e isso pode afetar a geração de metano.

O tempo de retenção nos reatores também afeta os rendimentos de digestão. Em condições de tratamentos mais longos, os corpos de muitos microrganismos servem também de alimento para as populações de bactérias famintas. Com isso, aumenta a geração de biogás e se reduz a quantidade de lodo a ser extraído.

O tempo de retenção tem relação direta com as eficiências do tratamento. Entretanto, há que se descobrirem os tempos ideais, que combinem a eficiência na biodegradação com as dimensões dos reatores – algo como relação benefícios/custos.

Importante se saber também que toda a DQO removida estará convertida em metano, gás carbônico e lodo anaeróbico (corpos de microrganismos). Uma parte da matéria orgânica, que foi recalitrante ou que não teve tempo de ser digerida, acabará como DQO ou DBO residual no efluente tratado.

É comum se terem bons valores de remoção de DQO de um efluente por ação de um tratamento anaeróbico, porém, se o tempo e as condições fossem mais favoráveis, essa remoção poderia ser maior. Já vimos que o próprio lodo velho ou corpos de microrganismos já mortos podem virar alimento aos demais organismos ativos, e assim, a biodegradação será ainda maior. Com isso, as concentrações de DQO residual e de SSV no efluente tratado serão menores e os rendimentos em remoção de DQO serão maiores.

Em função de tudo isso, a digestão anaeróbica se alicerça no fato de que ela ainda deve converter a maior parte da DQO removida em metano e não em gás carbônico ou em lodo anaeróbico. A produção de metano depende não apenas da degradação da DQO do efluente, mas também dos SSV nele presentes, seja originalmente, ou ainda devido à formação de partículas suspensas de lodo anaeróbico (corpos de microrganismos). Interessa então que a produção de SSV ou biossólidos seja a menor possível – esse é um dos fundamentos da digestão anaeróbica - “mínima geração de lodo em excesso para ser removido do sistema”. Está aí nesse fato o exato desafio que os operadores e projetistas de estações anaeróbicas de tratamento de efluentes devem ter como foco.

Os tratamentos de efluentes por sistemas anaeróbicos podem ser otimizados graças a uma série de sistemas auxiliares de monitoramento e controle, tais como:

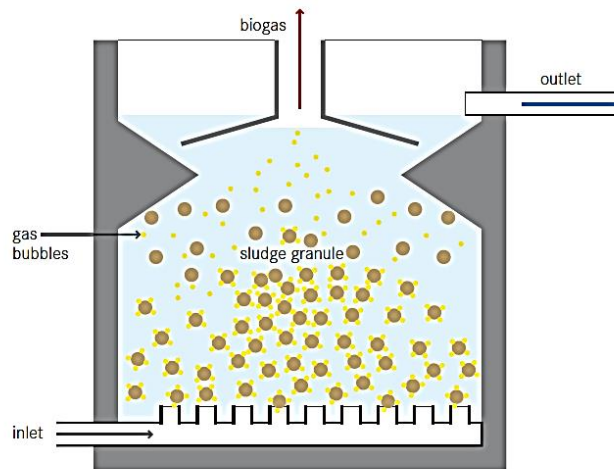
- ☞ Tanques de neutralização e de equalização de qualidade dos efluentes;
- ☞ Sistemas de equalização de fluxos para alimentação mais uniforme de cargas e volumes aos reatores;
- ☞ Sistemas de adição de nutrientes para garantia de balanceamento nutritivo no sistema;
- ☞ Sistemas de aquecimento para acertos de temperatura dentro dos reatores;

- ↳ Sistemas de resfriamento da temperatura dos efluentes, antes da entrada dos mesmos aos reatores;
- ↳ Decantadores para remoção de SST presentes no efluente e que possam ser problemáticos para o desempenho dos reatores. Alguns reatores (por exemplo; filtros anaeróbicos) são sensíveis à presença elevada de SS no efluente admitido aos mesmos.
- ↳ Sistemas de fragmentação mecânica, ultrassônica ou hidrolítica de sólidos suspensos orgânicos (SSV) de dimensões exageradas e que estejam presentes no efluente (fezes, estrumes, lodos ressequidos, etc.). Essa fragmentação aumenta a acessibilidade desses sólidos ao ataque microbiológico.
- ↳ Medidores automáticos para monitorar o desempenho e as operações do sistema em termos de fluxos, condutividade, pH's, temperaturas, níveis, etc.

O conjunto de ações projetadas e executadas em operações estáveis e seguras permite o sucesso do tratamento anaeróbico dos efluentes. Isso é válido para qualquer tipo de efluentes, desde que com altos teores orgânicos, como muitos dos efluentes do setor de celulose e papel.



REATORES ANAERÓBICOS E FORMAS DE TRATAR EFLUENTES POR MÉTODOS ANAERÓBICOS



Reator UASB
Fonte: Tilley et al, 2014

Apesar do conhecimento prático e científico que se tinha sobre a digestão anaeróbica já de alguns séculos, somente há algumas poucas décadas é que a mesma passou a ter aplicações práticas para tratar resíduos sólidos e efluentes líquidos.

A principal razão para os insucessos iniciais da digestão anaeróbica para tratar resíduos era a velocidade lenta da reação biológica, o que demandava a construção de enormes lagoas ou tanques para retenção do material a degradar.

Em função das inúmeras tentativas para tratar resíduos sólidos por esse processo, acabaram sendo desenvolvidos pequenos e médios biodigestores anaeróbicos para tratar estrumes, lodos, resíduos do agronegócio e de alguns tipos de indústria - a primeira delas e uma das mais bem sucedidas até hoje, a indústria alimentícia.

Os primeiros digestores para sólidos funcionaram muito bem para quem não tinha pressa, já que o tempo de biodigestão podia tomar semanas ou meses. Por isso, eram usados em fazendas e em residências simples do homem do campo, também para geração de biogás para uso no local de geração.

No caso de efluentes líquidos, o conceito acabava por exigir enormes lagoas anaeróbicas, onde o efluente era deixado para "estabilizar" por longo tempo em repouso nessas lagoas. Os fluxos de alimentação eram muito lentos e o efluente caminhava

vagarosamente para sofrer a biodegradação do material orgânico nele contido (ou dissolvido ou na forma de partículas de sólidos suspensos com alto teor volátil).

O desenvolvimento de estudos sobre a microbiologia dos tratamentos anaeróbicos onde os microrganismos se alimentavam dos poluentes orgânicos de líquidos evidenciaram dois fundamentos básicos:

- ✿ Há necessidade de íntimo contato dos microrganismos com o material solubilizado ou suspenso que se deseja degradar – se isso acontecer, a digestão será mais rápida e os rendimentos melhores;
- ✿ Quanto maior for a população de microrganismos presentes, maior será a capacidade que se terá para promover esse contato requerido e mais eficiente será o tratamento. Logo, a concentração alta da biomassa microbológica é um dos quesitos vitais para a eficiência dos reatores.

Em função desses fundamentos básicos, os primeiros reatores anaeróbicos surgiram, inicialmente apenas com a agitação do líquido no interior dos reatores – esses reatores se denominaram de “reatores de contato”. Tratava-se de tanques de concreto ou de metal com agitação interna em ambiente hermético para não haver entrada de ar. Na verdade, eram apenas aperfeiçoamentos em relação às lagoas anaeróbicas originais, onde também se passaria a agitar para melhoria nos contatos de microrganismos e poluentes orgânicos a degradar.

Inicialmente, não se reciclava lodo ou biomassa microbológica - isso só surgiu algum tempo mais tarde, com o desenvolvimento dos reatores de alta carga, ou com reciclo de lodo. Com esse retorno de lodo se poderia contemplar o segundo fundamento básico, que era o aumento da população biológica ativa no interior dos reatores.

Os reatores de alta carga foram desenvolvidos com base nos conceitos inovadores do Dr. Gatzke Lettinga e sua equipe, que iniciou suas pesquisas a partir dos anos 70's. Suas primeiras pesquisas trabalharam com o incremento da população de microrganismos dentro dos reatores para reduzir o tempo de detenção hidráulico e para aumentar a biodegradação do material. Essas pesquisas culminaram com o desenvolvimento do reator UASM (Reator de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo). A ideia foi a criação de um manto de lodo ativo rico em microrganismos e que ficaria suspenso dentro do líquido no reator, sendo que o efluente teria que passar através desse manto para seguir sua trajetória ascendente no reator. Esse reator de

alta carga acabou se fundamentando nos mesmos princípios adotados no caso do tratamento aeróbico por lodos ativados, ou seja, na acumulação de biomassa microbológica no interior do reator.

Essa alta concentração de lodo favorece o contato íntimo dos poluentes com os microrganismos, que por sua vez, usam essa poluição orgânica como alimento para seu desenvolvimento. Por isso, a DQO ou a DBO alimentada nos reatores é também denominada de Alimento em linguagem usual nas ETE's.

Para se conseguir esse acúmulo de biomassa microbológica, existem dois caminhos a seguir:

- Recirculação de lodo, sendo que lodo ativo que sair junto com o efluente do reator é recuperado e devolvido para dentro do reator;
- Pela restrição imposta à saída de lodo do interior do reator, só permitindo que saia o que se chamaria de excesso de lodo, ou seja, a quantidade que se quiser dispor de lodo por não ser necessário o seu retorno.

Dessa forma, o tempo de residência de lodo dentro do reator, que é também chamado de Idade do Lodo (IL), é bem maior do que o tempo de residência do efluente nesse mesmo reator (TDH = Tempo de Detenção Hidráulico).

Os reatores baseados nesses conceitos são denominados de reatores de alta taxa de aplicação de matéria orgânica, ou de alta carga. Isso porque se consegue colocar, dentro deles e por metro cúbico de reator, uma quantidade bem maior de alimento a degradar (ou de DQO). As altas cargas em tratamentos anaeróbicos podem atingir 20 a 30 kg de DQO/m³.dia – ou até valores maiores em reatores de alto desempenho.

O mais comum desses reatores é o do tipo UASB ("Upflow Anaerobic Sludge Bed") desenvolvido por Gatzke Lettinga e patentado na Holanda em início dos anos 80's.

Esse conceito inovador permitiu inclusive que os reatores de contato originais fossem aperfeiçoados e modernizados, permitindo avanços significativos em seus rendimentos e eficiências. Isso foi atingido se colocando um módulo de decantação de lodo para retirar lodo ativo do efluente tratado (extraído do reator) e se retornar a maior parte desse lodo para o interior do reator de contato.

O conceito do reator UASB é ligeiramente diferente, pois ele se baseia na criação de um manto de lodo na parte de baixo do reator e usa a força da gravidade para manter esse lodo suspenso e também para impedir que o lodo fuja do reator. Dessa forma, a parte inferior dos reatores UASB funciona como decantador, como biodigestor e como filtro, pois os grânulos de lodo atuam também na função de filtração do efluente.

Bem no fundo do reator se injeta o efluente bruto a ser tratado, de forma absolutamente equilibrada. Esse efluente começa a caminhar em sentido ascendente e terá que permear através do manto de lodo em suspensão.

Esse fluxo ascendente de efluente é controlado de tal forma que ele:

- ✓ Impedirá a decantação dos flocos ou grânulos de lodo para o fundo do reator. Se isso acontecesse, o reator se entupiria, seriam abertos canais preferenciais de fluxo e o seu volume útil diminuiria.
- ✓ Permitirá que apenas a quantidade desejada de lodo em excesso saia do reator, acompanhando o efluente tratado. Existem arranjos tecnológicos no interior do reator para manter o lodo aprisionado, impedindo que partículas de lodo caminhem para a saída do reator.

Os reatores UASB não precisam de enchimentos para crescimento de biofilmes. Os próprios flocos ou grânulos de lodo fazem esse papel e funcionam também como filtros. Os flocos de lodo são relativamente grandes (entre 0,5 a 5 mm de diâmetro, sendo essa granulação visível a olho nu).

Os grânulos ou flocos são aglomerados de microrganismos que são resistentes ao lento fluxo ascendente de efluente. Esses flocos vão crescendo e se adensando, tendo propensão a decantar por ação da força da gravidade. Entretanto, a missão do fluxo ascendente é também de empurrar esses flocos para cima de forma a manter os mesmos suspensos no seio do líquido no interior do reator UASB. Esse conjunto de flocos suspensos dá origem ao que se chama de manto ou colchão de lodo, que fica próximo ao fundo do reator.

Conforme os flocos se dispõem nesse manto, eles também passam a atuar como um filtro biológico, tendo microrganismos ativos nos flocos e impedindo que os flocos menores consigam subir com o efluente para a parte superior do reator.

Entretanto, falar e escrever isso tudo é fácil – o difícil foi desenvolver a tecnologia para que isso acontecesse da forma como requerida.

O sucesso desse reator UASB foi tão grande que seu nome se popularizou com essa sigla no mundo todo. Hoje é o reator mais popular dentre os utilizados para o tratamento anaeróbico de efluentes líquidos. Diversos aperfeiçoamentos tecnológicos e modernizações foram implementadas nos modelos iniciais, aumentando ainda mais sua efetividade e estabilidade operacional.

Outros tipos de reatores foram desenvolvidos com base em princípios similares, alguns usando enchimentos para permitirem o crescimento das colônias de microrganismos, outros usando módulos internos de decantação e até de membranas para filtração do efluente tratado.

Para fins didáticos, serão apresentados de forma rápida alguns dos principais tipos de reatores anaeróbicos. Faremos isso de forma a se ter alguma cronologia, começando com os sistemas mais antigos e incrementando tecnologia conforme os tipos forem sendo apresentados.

A. Lagoas Anaeróbicas



Fonte da foto

<http://www.epa.gov/agstar/anaerobic/ad101/anaerobic-digesters.html>

São grandes lagoas, geralmente sem agitação para evitar aeração do líquido, aonde o efluente vai sendo lentamente biotratado pelos microrganismos anaeróbicos nela presentes. O tempo de retenção do efluente na lagoa pode variar de uma a três semanas, por isso, demandam extensas áreas para sua construção.

Apesar do conceito simples, acabaram se tornando sistemas caros, pois a legislação exige que elas sejam impermeabilizadas no fundo e nas laterais com geotêxteis ou argila compactada, bem como, que existam sistemas de coletar o biogás formado e os outros gases que podem ser emitidos (amônia, gás sulfídrico, etc.). Caso os gases não sejam recolhidos, teremos sérios impactos ambientais, como emissão de odor e de grandes emissões de gases de efeito estufa.

As eficiências de redução da DBO até que são razoáveis, entre 45 a 85%, porém essas lagoas estão sendo cada vez mais substituídas por outros tipos de reatores. Também existe a possibilidade de se modernizar essas lagoas, incluindo reciclo de lodo e agitação interna e profunda, para não se introduzir oxigênio no sistema.

As principais vantagens das lagoas anaeróbicas são as seguintes:

- Conseguem degradar muito bem partículas de sólidos suspensos orgânicos presentes no efluente (fibras, fibrilas, finos celulósicos, fezes, estrumes, resto de alimentos, etc.);
- Produzem muito pequena quantidade de biomassa residual devido aos tempos longos de biodegradação;
- A operação é muito simples, embora tenha se tornado um pouco mais trabalhosa com a necessidade de se remover o biogás;
- Custos operacionais são baixos;
- Promovem boa estabilização e equalização do efluente.

Já como desvantagens dessas lagoas, podem ser relatadas as seguintes:

- Necessitam de grandes áreas para instalação;
- Necessitam muitas vezes de aquecimento para manter a temperatura do efluente dentro do que se estipula para o tratamento em questão. Para minimizar esse problema, as lagoas são quase sempre enterradas, com recirculações de efluentes e são mais indicadas para regiões quentes.

- Podem ser afetadas pelas condições climáticas (frio, chuvas, ventos, granizo, etc.);
- A coleta do biogás exige cuidados e tecnologias especiais, sendo que o metano deve ser consumido o mais perto possível do local de coleta.
- Existem muitas restrições ambientais para que ofereçam segurança ambiental e social. Em passado mais remoto, essas lagoas eram tratadas mais como um sistema pantanoso, até mesmo áreas de pântanos naturais eram utilizadas para esses tratamentos. Entretanto, esses tempos de sistemas inapropriados acabaram.

Na agricultura e em pequenos agronegócios se costumam encontrar lagoas anaeróbicas, com a finalidade de degradar fezes de suínos, efluentes de granjas, produções artesanais de alimentos, etc. Essas lagoas fazem um excelente papel nessas condições, pois resultam em boa degradação da matéria orgânica, geram poucos resíduos e consomem muito pouco nutrientes.

Pequenos empreendimentos agrícolas, sanitários e industriais costumam colocar em sequência uma lagoa anaeróbica e outra aeróbica logo a seguir. Conseguem melhorar o tratamento e a qualidade dos efluentes e tiram vantagens excepcionais que o tratamento anaeróbico oferece, como as acima mencionadas.

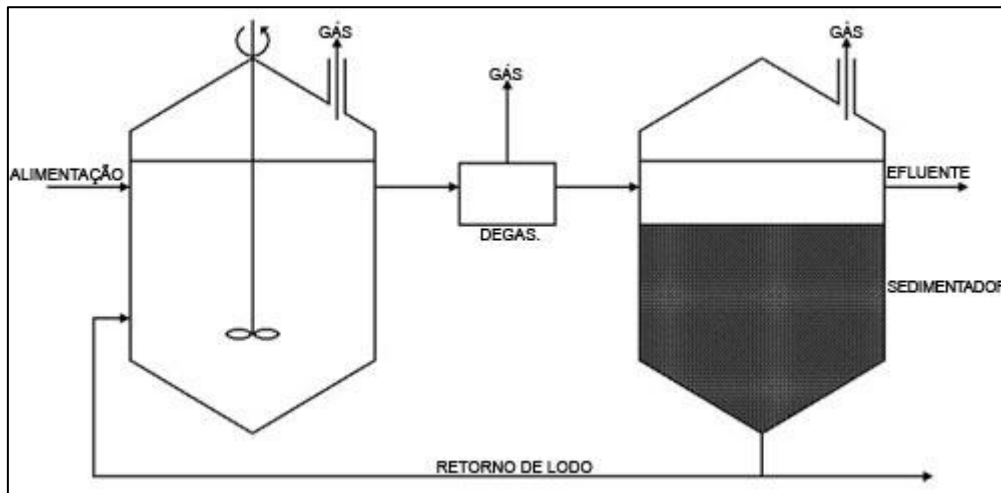


Lagoa anaeróbica

Fonte da foto:

http://www.colina.sp.gov.br/index.php?xvar=secretarias_planejamento_tratamento&id_grupo=6&id_subgrupo=4&id_identificador=1

B. Reatores de Contato



Fonte: CETESB, 2014

<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biog%C3%A1s/20-Reatores>

São reatores anaeróbicos onde se promove a agitação do efluente para aumentar as chances de contato entre os microrganismos e as moléculas de material orgânico poluente. Esse tipo de reator vem sendo aperfeiçoado e hoje se tem notado uma similaridade entre o mesmo e os sistemas de lodo ativado, que é um sistema tradicional aeróbico. A diferença entre eles é que a agitação acontece em condições herméticas e profundas, para que não haja penetração de ar no seio do líquido.

A agitação é feita não para aerar, mas para misturar bem o efluente com os sólidos suspensos voláteis da biomassa microbológica interna, ou partículas de lodo anaeróbico ativo e com alto conteúdo de microrganismos vivos.

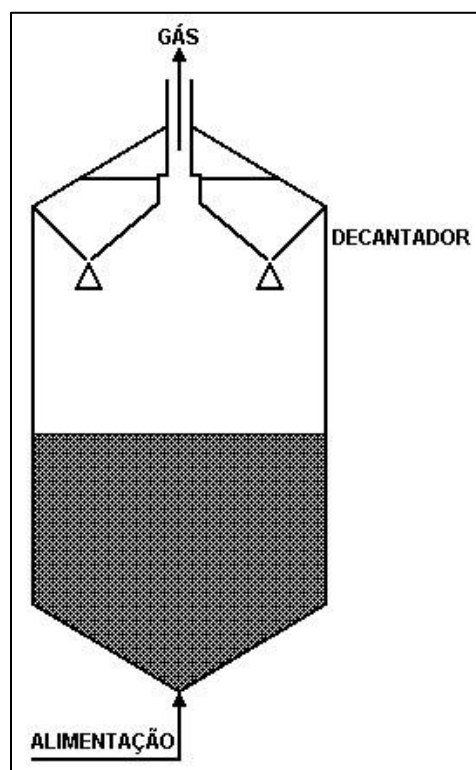
Esses sistemas são relativamente comuns em empresas de pequeno a médio porte, ou em pequenas municipalidades. Isso em função da eficiência muito boa para remoção de DBO (entre 70 a 90%), das facilidades operacionais e dos baixos custos de investimento e de operação.

A concentração em SSV no reator é mantida alta pela reciclagem do lodo, entre 3.000 a 10.000 ppm, algo superiores, portanto, às que se utilizam em sistemas aeróbicos de lodo ativado.

Para se conseguir a sedimentação das partículas de lodo, tem-se que construir um decantador em separado. Também exigem um desgaseificador para remoção do biogás, que pode ser usado pelo próprio empreendimento.

As cargas orgânicas aplicadas não são muito altas, entre 1 a 3 kg DBO/m³.dia.

C. Reator UASB



Reator UASB com sistema de decantação para retorno de lodo no topo

Fonte da figura:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biogás/20-Reatores>

O reator UASB tem sido aquele que mais se popularizou desde o seu desenvolvimento em início dos anos 80's. Atualmente, diversas empresas que oferecem tecnologias de tratamento de água produzem e comercializam esse tipo de reatores com diversos aperfeiçoamentos tecnológicos. Destacam-se as empresas: Paques, Veolia, Degrémont e Waterlau, dentre outras.

O reator UASB é bastante resistente a choques de qualidade do efluente e tem excelentes controles operacionais, já que esses controles são vitais para permitirem uma equilibrada operação.

Qualquer reator UASB se fundamenta nos seguintes princípios:

- ↗ Formação de um manto de lodo floculado que fica suspenso no líquido na parte inferior do reator;
- ↗ O fluxo de efluente é ascendente e em sentido contrário à tendência de queda dos flocos de lodo. A velocidade de ascensão do efluente é baixa, entre 0,5 a 1,5 m/h. Isso para manter e estabilizar o manto de lodo.
- ↗ Os flocos vão aumentando de tamanho no manto de lodo. Isso permite que esse manto funcione tanto como um filtro bem como um biofilme, facilitando o ataque e a retenção de matéria orgânica poluente contida no efluente alimentado.
- ↗ O manto de lodo não pode de maneira alguma se compactar e decantar ao fundo do reator, pois isso criaria canais preferenciais de fluxo do efluente, restringiria a saída do mesmo e reduziria o volume útil do reator.
- ↗ A densidade dos flocos de lodo deve variar do fundo para o topo do reator. Os flocos mais pesados decantam mais que os mais leves.
- ↗ Antes da saída do efluente existem sistemas de decantação e recirculação de partículas de lodo.
- ↗ Na saída do efluente, por uma canaleta lateral na parte alta do reator, a quantidade de sólidos suspensos deve ser mínima.
- ↗ Com a elevação dos gases formados para cima, as bolhas tendem a arrastar partículas de lodo para o alto. Os sistemas de separação gases/líquido e líquido/sólidos devem ser exemplares.
- ↗ Os gases formados, que constituem o biogás, são removidos pelo topo do reator.
- ↗ Pode existir também uma zona externa para decantação de flocos, quer sejam eles para retorno ao reator ou para extração como lodo em excesso.

- ↗ A idade do lodo deve ser criteriosamente controlada, para evitar que o lodo envelheça demais.
- ↗ A remoção do lodo não deve de maneira alguma exceder à taxa de formação de novas células de microrganismos, senão, em pouco tempo a colônia de microrganismos será eliminada do sistema.
- ↗ Em função do envelhecimento do lodo, ele precisa ser removido para troca, e isso costuma acontecer a cada 2 a 3 anos.
- ↗ A concentração de sólidos suspensos voláteis no manto de lodo floculado é variável em função de condições que se deseje operar, mas é mais variável no sentido base topo do reator. São comuns nas regiões baixas do reator se atingirem concentrações acima de 50.000 ppm de SSV's.
- ↗ A carga orgânica volumétrica costuma variar entre 3 a 20 kg DBO/m³.dia, dependendo do tipo de efluente, de sua biodegradabilidade, do tempo de detenção hidráulico, da idade do lodo e do conceito tecnológico e operacional do reator.
- ↗ Os reatores UASB costumam operar tanto em condições mesofílicas (mais vagarosas) ou termofílicas (mais rápidas).
- ↗ Não existe qualquer tipo de agitação no interior dos reatores.
- ↗ Os reatores UASB podem aceitar para tratar efluentes com muito baixas concentrações de DQO (até 400 ppm).

Os fatores críticos de controle para um bom desempenho de um reator UASB são os seguintes:

- ☞ O lodo precisa estar floculado ou granuloso, caso contrário haverá um enorme arraste de sólidos suspensos voláteis com o efluente.
- ☞ A distribuição do efluente no fundo do reator deve ser bastante uniforme e não devem surgir canais preferenciais. A subida do efluente deve ser uniforme e vagarosa, sendo que o fluxo ascendente favorece muito esses fatores. A distribuição do efluente é feita por injetores múltiplos e cada um deles deve abarcar uma área entre 2 a 4 metros quadrados.

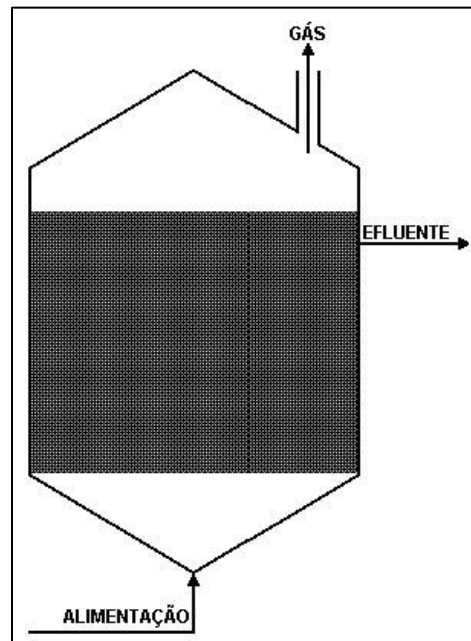
- ↳ A velocidade linear deve ser tal que não quebre os flocos, que evite que eles decantem, que impeça entupimentos do reator, ou que não permita que os flocos sejam arrastados para fora do reator. As velocidades mais comumente utilizadas estão entre 0,5 a 1,5 m³/m².h ou 0,5 a 1,5 m/h.
- ↳ Os sistemas de separação sólidos/gases/líquido devem ser muito efetivos para evitar arraste de gases e de sólidos com o efluente. Se isso acontecer estaremos gradualmente reduzindo a idade do lodo e/ou colocando gases poluentes na atmosfera.
- ↳ O reator deve ser hermético para evitar entrada de oxigênio ou saída de metano.
- ↳ Entupimentos são proibidos na entrada e saída do efluente e na saída de gases.

As principais vantagens dos reatores UASB podem ser relacionadas como sendo:

- ❖ Permitem tratamento de efluentes a altas cargas de aplicação;
- ❖ Possuem altíssima flexibilidade para tratar efluentes com concentrações muito variadas de DBO ou de DQO;
- ❖ Trabalham com baixa perda de sólidos;
- ❖ Necessitam muito baixa extração de lodo em excesso;
- ❖ Operam com baixos tempos de retenção hidráulica;
- ❖ São muito eficientes para remoção de DBO (60 a 95%) e para produção de metano a partir dos poluentes orgânicos (95% de aproveitamento do metano que poderia ser produzido nas condições estequiométricas).
- ❖ Permitem rearranjos e flexibilidade operacional.

Em função de suas vantagens e confiabilidade tecnológica, esses reatores são muito utilizados pela indústria (alimentícia, celulose e papel, têxtil, agroindústria e saneamento básico municipal).

D. Reatores de Leito Fixo ou Filtros Biológicos Anaeróbicos



Filtro anaeróbico de leito fixo

Fonte da figura:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biogás/20-Reatores>

Esses reatores possuem um leito estacionário em seu interior que tem a missão de permitir o crescimento dos microrganismos sobre os elementos do mesmo. Esses elementos ficam empacotados no interior do reator e podem ser de: areia, cascalho, brita, pedras de escória, plástico, cerâmica, etc. Os elementos podem ter formatos distintos (anéis, tubinhos, etc.) e seus tamanhos variam entre 15 a 55 mm.

O conceito tecnológico é bem simples: o efluente vai sendo filtrado e tratado biologicamente conforme circula através desse leito estacionário. Isso porque os microrganismos colonizam a superfície desses elementos e formam um biofilme ativo e com alta capacidade de ter contato com o efluente circulante.

Os filtros biológicos são mais fáceis de serem operados que os reatores UASB, já que não há necessidade de se preocupar em manter um manto de lodo em suspensão.

Quanto menores forem os elementos de enchimento, maior será a superfície disponível para formação do biofilme e para contato com o efluente. Entretanto, existem limites para essas dimensões,

pois se forem muito pequenos podem dificultar o trajeto do efluente no interior do reator e podem entupir com mais facilidade.

O leito de enchimento não apenas permite e favorece o contato dos microrganismos com o efluente, como também retém partículas sólidas presentes no efluente. Caso um efluente seja muito rico em SST, ele pode causar problemas de entupimentos ao filtro. Nesses casos, se faz necessária uma remoção prévia dos sólidos suspensos por decantação, flotação, peneiramento, etc.

A maioria dos filtros biológicos opera com fluxos ascendentes, pois com isso se mantém uma superfície móvel de efluente e diminuem as formações de canais preferenciais. Entretanto, existem modelos com fluxos descendentes, mas há que se ter uma excelente distribuição na entrada para garantir estabilidade do fluxo interno.

A operação no sentido ascendente possibilita um melhor controle na saída dos SSV's de dentro do reator. Esses sólidos suspensos voláteis podem ser fragmentos de biofilmes, flocos de microrganismos ou mesmo células individuais dos mesmos.

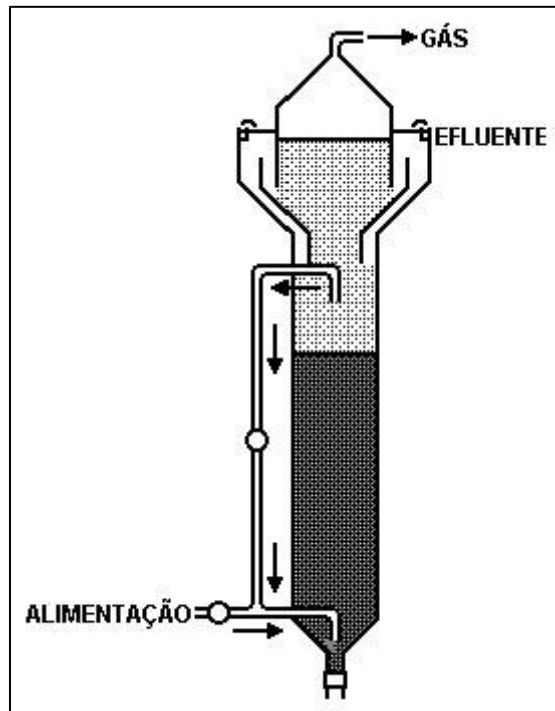
Os filtros anaeróbicos permitem ótimos valores de remoção de DBO (entre 50 a 90%), entretanto existem relatos de que a eficiência para remoção de nitrogênio não é tão boa.

O tempo de detenção hidráulica pode variar entre 12 a 36 horas. A idade do lodo pode ser aumentada pela recirculação de microrganismos, que podem ser separados por sistemas externos de decantação do efluente após o reator.

Os filtros anaeróbicos são sistemas robustos, fáceis de operar e de controlar, são resistentes a choques e flutuações de qualidade do efluente (evidentemente, dentro de certos limites).



E. Reatores de Leito Fluidizado



Reator anaeróbico de leito fluidizado

Fonte da figura:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biogás/20-Reatores>

Esses reatores consistem em tanques onde se procura manter os elementos de enchimento suspensos e parados no líquido interno circulante, melhor dizendo, fluidizados e suspensos no corpo do líquido. Sobre esse material crescem os microrganismos, formando os conhecidos biofilmes. Com isso, a biomassa microbológica se mantém também fluidizada. Ali ocorrerão, tanto as reações de transferência de massa como a intensa atividade microbológica.

Esses reatores são mais complexos e mais difíceis de serem operados, mas permitem obtenção de altas eficiências para remoção de poluentes orgânicos e estabilização da matéria orgânica.

A fluidização é a chave do sucesso do processo. O efluente é adicionado no fundo do reator e tem seu fluxo controlado de forma tal que promove a fluidização do leito de areia. Esse leito de areia não deve acompanhar o fluxo de efluente para cima – deve, isso sim, permanecer estacionário e suspenso. Os grãos de areia não devem nem subir e nem decantar – assim se define o que se chama de fluidização.

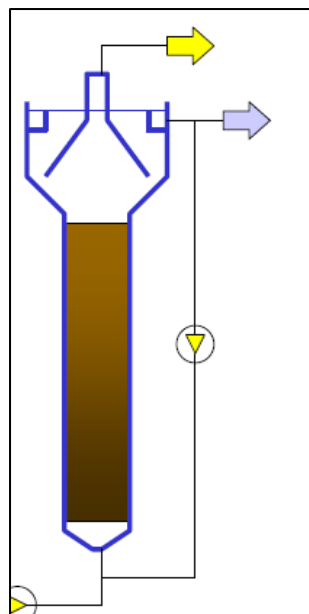
Como os elementos de enchimento são muito finos, a superfície para crescimento do biofilme é enorme. Isso acelera as reações metabólicas e reduz o tempo de tratamento.

Na verdade, os reatores de leito fluidizado simulam a operação dos reatores UASB, só que usam um leito de enchimento para que os microrganismos cresçam sobre ele. Esse material fino pode ser areia, carvão ativado, etc.

A recirculação do efluente pode ser realizada e tem como metas: ajustar as velocidades internas, regularizar fluxos e retornar lodo ao sistema.

O biogás e o efluente tratado são removidos pela parte superior do reator, através de adequados sistemas de separação líquido/gases e líquido/sólidos.

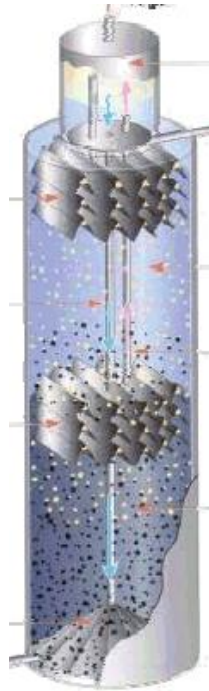
F. Reator EGSB ("Expanded Granular Sludge Bed Reactor")



Reator EGSB
Lettinga Associates, 2010

Trata-se de um reator UASB modificado de forma a ter um manto de lodo muito mais alto, possibilitando um aumento de possibilidades de contato do efluente com as colônias de microrganismos.

G. Reator IC ("Internal Circulation Reactor")



Reator IC
Lettinga Associates, 2010

O reator IC é um aperfeiçoamento do reator UASB comercializado pela empresa Paques Water Systems. Costuma-se dizer que um reator IC consiste de dois reatores UASB em série no mesmo tanque.

O reator inferior recebe o efluente bruto como fonte de alimento. Esse efluente recebe um reciclo de efluente coletado logo após a separação de gases do reator superior. Com isso, recicla-se algum lodo e se ajustam as concentrações de SSV nos reatores.

O reator superior recebe um efluente já previamente tratado e com muito menor DQO a remover. Com isso, a relação entre flocos de lodo e poluentes aumenta muito. Os microrganismos ficam famintos e atacam com voracidade os poluentes orgânicos dissolvidos e muitos suspensos, como corpos mortos de microrganismos ou células de organismos debilitados. O nível de canibalismo permite maiores reduções de DQO, menor geração de lodo e maior produção de metano.

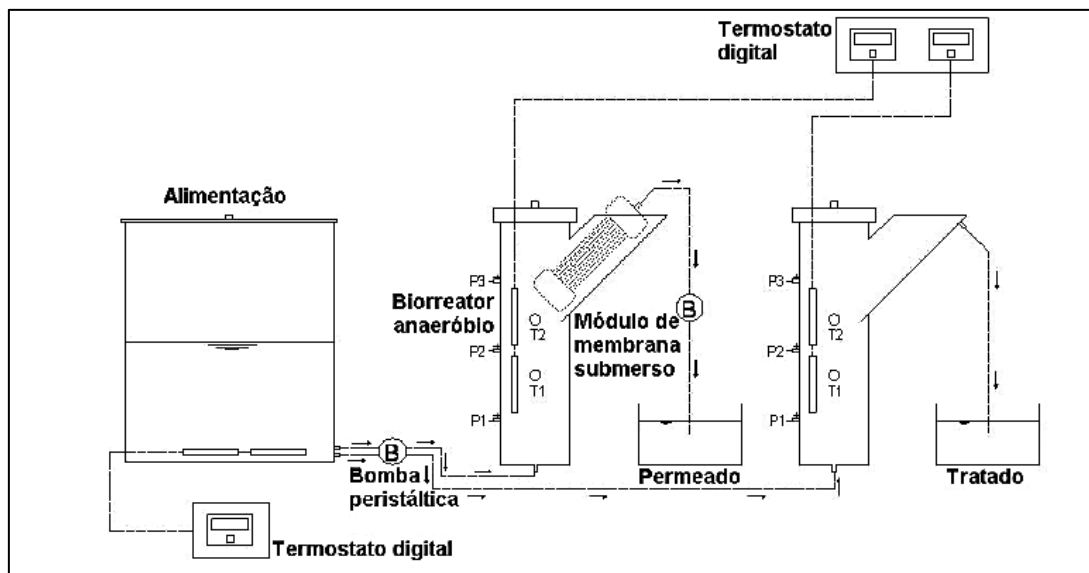
Esse tipo de reator permite que se trabalhe com efluentes muito mais concentrados e podem receber cargas orgânicas maiores do que

os reatores UASB convencionais. Alguns desses reatores existem operando em fábricas de celulose e papel (em processos sulfito e NSSC).

H. Reatores Anaeróbicos de Membrana

Consistem em reatores anaeróbicos convencionais onde se acopla um módulo final de membrana (nano ou ultrafiltração) para purificação adicional do efluente tratado. Com isso, são separados íons, gases e partículas, dependendo da membrana utilizada no módulo. As membranas permitem uma melhor separação gases, sólidos e líquidos.

O efluente tratado é bastante limpo e a água pode eventualmente ser recirculada como água de processo para a instalação industrial, caso não existam outras limitações tecnológicas ou ambientais.



Reator anaeróbico de membrana
Loures, 2007

I. Sistemas híbridos

São sistemas que englobam dois ou mais módulos de reatores. Pode-se usar o reator básico como sendo o UASB e depois se utilizar outro reator como módulo seguinte. Esse módulo pode ser um filtro anaeróbico ou aeróbico e até mesmo um reator aeróbico de lodo ativado.

Os sistemas híbridos permitem que se trabalhe com altas cargas orgânicas (acima de 20 kg DQO/m³.dia), possuem mais altas taxas de remoção de DBO ou DQO e são mais tolerantes a choques e variações de qualidade dos efluentes alimentados.



Enchimentos
Lettinga Associates, 2010

Conhecendo os tipos de reatores, torna-se importante também conhecer alguns detalhes construtivos e alguns índices de desempenho que a maioria desses reatores permite atingir:

Volume do reator: 200 a 10.000 m³

Fluxos de entrada: 3.000 a 20.000 m³/dia

DBO de entrada: 400 a 10.000 ppm

DQO de entrada: 1.000 a 30.000 ppm

Temperaturas mesofílicas: 30 a 40 °C

Temperaturas termofílicas: 45 a 65°C

Carga orgânica volumétrica aplicada: 3 a 20 kg DQO/m³.dia

Tempo de retenção ou detenção hidráulica: 5 a 24 horas

Eficiência na remoção de DBO: 65 a 95%

Eficiência na remoção de DQO: 45 a 80%

Produção de metano: 0,20 a 0,33 m³ CNTP/kg DQO removida

Produção de biogás: 0,3 a 0,42 m³ /kg DQO removida

Para efeito de conhecimento didático, seguem algumas das fórmulas para cálculo de alguns desses índices:

Tempo Detenção Hidráulico = Volume do reator / Vazão de efluente

Unidade: dias ou horas

Idade do Lodo = (Massa Sólidos Suspensos Voláteis no reator) / (Massa de Sólidos Suspensos Voláteis extraídos como excesso de lodo mais os SSV no efluente final)

Unidade: dias

Concentração de matéria orgânica: expressa em kg DBO ou DQO/m³

Alimento aplicado = (Concentração de DBO ou DQO) x Fluxo efluente alimentado ao reator

Unidade: kg DBO ou DQO/dia

Carga Orgânica Volumétrica Aplicada = Alimento / Volume do reator

Unidade: kg DBO ou DQO/m³.dia

Essas variáveis todas se interagem e ajudam a controlar rendimentos e a efetividade do trabalho dos reatores.

É muito importante também que a microbiologia seja monitorada: o lodo deve estar ativo, vivo e dinâmico, com fome de alimento. Idades de lodo muito elevadas podem não ajudar na obtenção de altos rendimentos. Por isso, deve-se sempre acompanhar a efetividade da ação dos microrganismos.

A otimização da operação é uma tarefa diária dos operadores de estações de tratamento de efluentes. Essas otimizações implicam em se acompanhar rendimentos e vitalidade dos microrganismos.

Quaisquer alterações que se pretendam introduzir no sistema (mudanças de tipos de efluentes e de fluxos, insumos, tipo de nutrientes, etc.) devem ser precedidas de avaliações prévias em escala de bancada ou de plantas piloto.

Já vimos uma detalhada apresentação anterior sobre os fatores críticos para o sucesso da digestão anaeróbica, e por extensão, para o bom desempenho dos reatores que operam com esse tipo de biodigestão.

Logo, os reatores, mesmo os modernos e modernizados tecnologicamente, costumam sentir os efeitos de fatores críticos que fujam das condições ideais de operação. A missão do reator é dar alimento para as colônias de microrganismos e condições para que elas cresçam, multipliquem e eliminem a maior parte desse alimento oferecido. Por isso, o controle efetivo do alimento, suas quantidades e qualidades são vitais.

Ajustes nos reatores são sempre requeridos e a instrumentação de controle deve estar muito bem calibrada e oferecer valores com credibilidade.

Os operadores podem também necessitar fazer ajustes de fluxos, de concentrações, de reciclagens e até mesmo de agitação internamente aos reatores. Tudo que eles fazem deve ter como foco que as reações metabólicas e as transferências de massa possam ser otimizadas. A estabilidade e a continuidade operacional devem ser privilegiadas também.

A melhoria dos reatores tem permitido se resolverem diversos problemas que limitavam a utilização dos processos anaeróbicos no passado.

Por exemplo, hoje em dia se pode trabalhar com:

- ψ Efluentes com temperaturas mais frias (15 a 20°C) ou mais quentes (65°C);
- ψ Efluentes bastante diluídos (DBO próxima a 400 ppm);
- ψ Compostos que anteriormente eram tóxicos ou inibidores em baixas concentrações (formaldeído, clorofenóis, metanol, etc.);
- ψ Sólidos suspensos ou compostos orgânicos de difícil biodegradabilidade (ceras, graxas, proteínas, etc.).

Enfim, os reatores e seus avanços tecnológicos têm possibilitado rápido desenvolvimento de uma tecnologia que apesar de antiga, só há umas quatro décadas começou a deslanchar em aplicações práticas na indústria e no saneamento básico.



UTILIZAÇÃO DE TRATAMENTOS ANAERÓBICOS DE EFLUENTES INDUSTRIAIS NO SETOR DE CELULOSE E PAPEL

Atualmente, os processos anaeróbicos vêm sendo mais utilizados em estações de esgotos domésticos, da indústria alimentícia e em empreendimentos agropecuários. Entretanto, esse tipo de tratamento tem mostrado muito potencial para outros tipos de indústrias, como a de celulose e papel e outros tipos de setores da indústria de base florestal plantada.

Apesar das inúmeras vantagens que possuem, inclusive a possibilidade de serem associados a processos aeróbicos em operações híbridas, os processos anaeróbicos não tem merecido a devida atenção do setor de celulose e papel.

Dentre os principais obstáculos para a sua adoção nesse setor estão os seguintes:

- Cultura de tratar grandes volumes de efluentes misturados em uma única estação de tratamento de efluentes;
- A tradição e o sucesso alcançado até o momento com os processos aeróbicos;
- A necessidade de se ter a ETE como um setor mais qualificado em caso de adoção de processos híbridos, pois as operações serão mais demandantes de especialização técnica.
- A acomodação em relação a pagar os valores elevados para tratar efluentes e dispor lodos em grandes quantidades, considerando isso mais como um dever legal a ser cumprido.

O setor de celulose e papel está definitivamente acostumado com os processos aeróbicos, e essa cultura aeróbica acaba sendo fortalecida pelas alegadas fraquezas relatadas para algumas formas anaeróbicas de tratar efluentes. Muitos executivos e técnicos acreditam que algumas dessas desvantagens possam significar mais custos ou mais dificuldades para atingimento das restrições legais. Eles acabam se esquecendo de que os processos anaeróbicos têm inúmeras possibilidades de uso separado em efluentes setoriais ou em associação com tratamentos aeróbicos para ETE's de muito alta eficiência.

Dentre os fatores dos processos anaeróbicos que preocupam os técnicos do setor de celulose e papel temos os seguintes:

- ☆ Menores níveis de redução de DQO e DBO;
- ☆ Pouca influência na remoção da cor do efluente;
- ☆ Tempos mais longos para arranques e estabilizações dos sistemas anaeróbicos;
- ☆ Produção de compostos de mau odor e que podem escapar para a atmosfera (amônia, gás sulfídrico, aldeídos, sulfetos, etc.);
- ☆ Sensibilidade alta em relação a compostos tóxicos e inibidores do metabolismo microbológico (extrativos da madeira, residuais de oxidantes do branqueamento da celulose, etc.);
- ☆ Sensibilidade a variáveis qualitativas e quantitativas do efluente a ser tratado;
- ☆ Demanda de maiores cuidados operacionais, de monitoramento, controle e qualidade de informações instrumentais.

Por outro lado, as vantagens intrínsecas dos processos anaeróbicos têm sido incrementadas pelos aperfeiçoamentos tecnológicos atingidos, com diversos fabricantes de equipamentos detendo tecnologias de ponta. Além disso, muitos avanços estão acontecendo em tratar efluentes domésticos e de algumas indústrias por esses meios – isso tem alavancado bons exemplos e boas práticas operacionais.

O setor de celulose e papel já sabe das principais vantagens dos processos anaeróbicos, como menores investimentos, menores custos operacionais por unidade de DQO removida, menor geração de lodo a descartar, baixos consumos energéticos, menores necessidades de nutrientes, produção de biogás, etc. Isso pode ajudar a que esses processos possam ganhar mais espaço nesse setor e em setores afins.

A indústria de celulose e papel gera, como sabemos, enormes volumes de efluentes, os quais possuem em sua constituição compostos químicos orgânicos e inorgânicos, que são usados ou gerados durante os processos de conversão da madeira em celulose e da celulose ou aparas de papel em papéis. Quase sempre, as fábricas misturam todos os seus efluentes e os encaminham para

serem tratados em sofisticadas (às vezes, nem tanto) ETE's, quase sempre a nível secundário. Os tratamentos mais comuns são o tratamento aeróbico por lodos ativados e o por lagoas aeradas.

As fábricas de pastas de alto rendimento e as de papel reciclado também geram efluentes contaminados em materiais orgânicos. Esses efluentes variam em cada situação e precisam de tratamentos adequados a cada tipo. Outros tipos de fabricantes de celulose, como os de pastas semiquímicas (processo NSSC ou soda a frio), ou de polpas para dissolução também enfrentam problemas a resolver com a geração de efluentes para serem tratados. Já os fabricantes de celulose sulfito são unânimes em recomendar a digestão anaeróbica para tratar os condensados da evaporação de sua lixívia, que é muito rico em ácidos orgânicos voláteis (especialmente ácido acético).

A digestão anaeróbica vem sendo observada e em alguns casos utilizada no setor de celulose e papel. Isso tem acontecido para efluentes de fábricas de menor porte, seja de celulose ou de papel. Fábricas de celulose que não possuem sistemas de recuperação de licor da polpação são também candidatas naturais para usar esses processos anaeróbicos. A digestão anaeróbica tem sido ainda adotada na estabilização e degradação de lodos gerados nos processos produtivos, seja da fabricação do papel, como da celulose.

O uso da digestão anaeróbica tem tido uma aceitação lenta, em função dos reconhecidos potenciais tóxicos de compostos residuais do branqueamento da celulose, dos pH's extremos de alguns efluentes (muito ácidos ou muito alcalinos), bem como da presença de alguns tipos de extrativos tóxicos de madeira (resinas de coníferas).

O possível crescimento da digestão anaeróbica no setor de celulose e papel estará condicionado muito provavelmente a uma mudança de cultura, passando a serem utilizados tratamentos "kidney" para efluentes de altas cargas e médios fluxos. Com a eliminação ou redução dos impactos desses poluentes setoriais críticos por tratamentos localizados, a ETE final será de muito menor dimensão, com redução significativa nos custos de investimentos e de tratamentos.

Outros fatores atrativos ao setor são aqueles relacionados ao potencial de recuperação de enxofre dos efluentes (recuperados como H₂S), à desalogenação de organoclorados (redução do AOX dos efluentes) e à produção de biogás.

As empresas poderão usar tratamentos anaeróbicos para tratar seus efluentes mais contaminados e depois misturarem esse efluente tratado por meio anaeróbico com outros de menores cargas poluentes para um tratamento de polimento final (que em geral é aeróbico). Isso dá origem aos conhecidos tratamentos híbridos anaeróbicos/aeróbicos, que podem oferecer vantagens inequívocas às empresas do setor.

Em muitas situações de adoção desses tratamentos híbridos, a economicidade da área ambiental é bastante favorecida, principalmente pelos créditos energéticos do biogás. Com isso, quanto maior a quantidade de poluentes orgânicos for tratada anaerobicamente, maior será a geração de biogás para uso na empresa como biocombustível. É um dos poucos casos onde a poluição de efluentes é utilizada para se produzir algo comercial.

A adoção de tratamentos anaeróbicos em fábricas do setor de celulose e papel vem sendo relatada como datada do início dos anos 70's. Inicialmente, os tratamentos eram por lagoas anaeróbicas. Com o surgimento dos reatores de alto desempenho, algumas fábricas de papel reciclado e fábricas de celulose sulfito ou de pastas de alto rendimento passaram a se interessarem e algumas a adotarem esses reatores.

Nem todos os efluentes das fábricas de celulose e papel podem ter sucesso em seu tratamento anaeróbico. Por essa razão, estudos preliminares devem ser feitos para avaliação de níveis de recalcitrância (menor nível de biodegradabilidade) e de toxicidade. Esses estudos permitirão melhores e mais sábias decisões sobre o que adotar e para o que!

Existem atualmente algumas dezenas de fábricas de celulose e papel que utilizam algum tipo de tratamento anaeróbico para seus efluentes industriais. Os países onde mais se localizam essas fábricas estão localizados na Europa (Alemanha, França, Holanda, Itália, Espanha, Áustria, Bélgica, Reino Unido, Finlândia), Américas (USA, Canadá, Brasil) e Ásia (Índia, China, Paquistão, Malásia, Indonésia).

Curiosamente, as fábricas dominantes para fabricar celulose, que são as que usam o processo kraft, são as que menos se valem das vantagens dos processos anaeróbicos, apesar de existirem diversas oportunidades para seu emprego e com muitas chances de sucesso.

As fábricas do setor de celulose e papel que utilizam processos anaeróbicos para líquidos ou efluentes contaminados gerados em suas operações são:

1. Fábricas de papéis reciclados (papéis higiênicos, sanitários e papelões);
2. Fabricas de fibras secundárias recicladas ou de pastas DIP ("Deinked Pulps"), que destintam aparas;
3. Fábricas de celulose sulfito;
4. Fábricas de pastas de alto rendimento;
5. Fábricas de pastas de não-madeira;
6. Fábricas de celulose semiquímica (NSSC, por exemplo);
7. Fábricas de papéis kraft naturais;
8. Fábricas de polpas solúveis.

Dentre os efluentes setoriais e gerais mais comumente sendo tratados por processos anaeróbicos podem ser relacionados os seguintes:

- ☆ Efluentes de fábricas de papel reciclado, com altas concentrações de: amido, fibrilas, finos celulósicos e cargas minerais;
- ☆ Efluentes e lodos do destintamento de aparas de papel;
- ☆ Efluentes gerais (decantados ou não) de fábricas de pastas de alto rendimento;
- ☆ Efluentes gerais de fábricas (em geral asiáticas) de produção de fibras vegetais não-madeira (palhas de cereais, bambus, kenaf, crotalária, etc.);
- ☆ Condensados da evaporação da lixívia de cozimento de fábricas sulfito ácido e magnefite;
- ☆ Águas da lavagem de toras e do pátio de madeira;
- ☆ Efluentes contaminados por derrames de licores e por águas de lavagens, etc.
- ☆ Percolados de pátios de estocagem de resíduos sólidos industriais;

- ☆ Percolados de aterros industriais;
- ☆ Efluentes de fábricas de celulose sulfito que não recuperam os lignosulfonatos;
- ☆ Águas quentes contaminadas com matéria orgânica;
- ☆ Efluentes estocados em lagoas de emergência de efluentes com alto grau de AOV's – Ácidos Orgânicos Voláteis;
- ☆ Efluentes mais concentrados de sequências de branqueamento da celulose com lavagem em contracorrente;
- ☆ Efluentes com concentrações elevadas de AOX (organoclorados), mas que não tenham altos níveis de toxicidade.

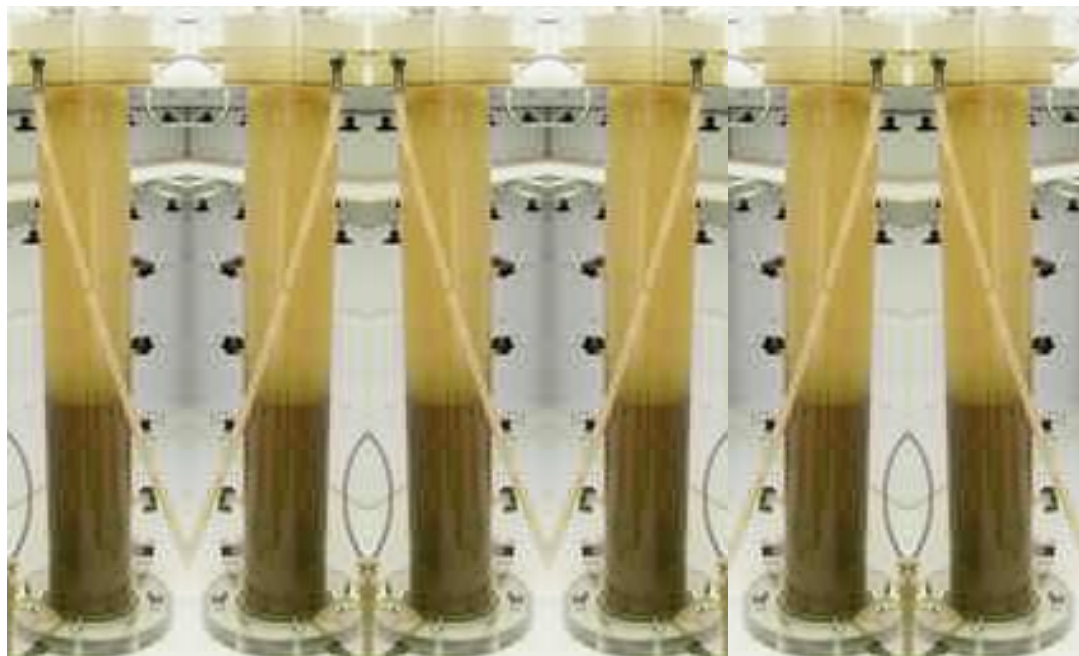
Diversos desses efluentes mostram altas concentrações de materiais orgânicos dissolvidos ou de partículas de sólidos suspensos orgânicos (finos celulósicos, fibrilas, fibras, etc.). Esses efluentes podem ser enviados preliminarmente para decantação dessas partículas em caso de não conformidade dos reatores à presença excessiva de SSV's. Em caso do sistema anaeróbico ser tolerante a esses SSV's de pequenas dimensões, o efluente pode ser tratado assim mesmo.

Depois do tratamento anaeróbico, o efluente sofrerá uma decantação secundária que vai remover tanto os SSV's originais que sobraram como as partículas de lodo orgânico formado pelo crescimento microbiológico (e que escaparam do sistema).

Para fins de melhor entendimento didático e de poder assim se entender melhor como as coisas acontecem ou poderão acontecer no setor de celulose e papel, vamos detalhar algumas especificidades desse setor e as relações das mesmas com a digestão anaeróbica de efluentes. Para facilitar entendimentos, vamos discutir alguns tópicos chaves, desde a constituição da madeira até alguns processos vitais na produção de celulose e papel. Com isso, diversos temas de muito interesse do setor e relacionados aos processos anaeróbicos de tratar efluentes poderão ficar mais claros aos leitores.

Em alguns casos, pode haver um sentimento de que o tema já foi discutido em alguma outra seção anterior desse capítulo, porém

nesses casos, não se aborrecam – considerem isso como uma oportunidade de rever conceitos para melhor fixação dos mesmos.



Reatores UASB laboratoriais

A. Digestão anaeróbica e lignina

A lignina é o segundo mais abundante constituinte da madeira, ocorrendo em teores que variam entre 20 a 30% da massa seca de madeira. Após os processos químicos de polpação, o teor de lignina nos efluentes se eleva bastante, atingindo mais da metade dos constituintes orgânicos das lixívias, na forma de derivados de lignina.

A lignina é relativamente hidrofóbica e os fragmentos de lignina de mais altos pesos moleculares são de difícil biodegradabilidade (mais alta recalcitrância). Por essa razão, a decomposição e estabilização/humificação da lignina são bem mais demoradas do que as dos carboidratos da madeira. O húmus de lignina é um dos principais constituintes de sedimentos de fundos de lagos e pântanos, onde a digestão anaeróbica ocorre regular e naturalmente.

Os fragmentos de lignina de baixo peso molecular são mais fáceis de serem degradados por processos biológicos, sejam

aeróbicos ou anaeróbicos. Por isso, a biodegradabilidade da lignina é inversamente proporcional ao peso molecular dos fragmentos e ao estado de condensação nos mesmos.

A lignina por si só não se constitui em agente de inibição ou toxicidade, ela é apenas mais recalcitrante à decomposição. Gera valores altos de DQO, mas apresenta baixos valores de DBO. Entretanto, as moléculas cloradas de lignina podem mostrar algum efeito citotóxico para as células dos microrganismos anaeróbicos.

B. Digestão anaeróbica e carboidratos

As hemiceluloses são facilmente biodegradadas por processos anaeróbicos. A celulose é um pouco mais demorada para biodeterioração, isso devido às suas regiões cristalinas, mas também não oferece problemas para a digestão.

Um dos exemplos mais clássicos da biodigestão anaeróbica de carboidratos é sempre relatado como a ação digestiva no estômago dos animais ruminantes. Evidentemente, nesses rumens também se forma o biogás. Por essa razão é que a pecuária bovina está sempre sendo citada como um dos grandes causadores de gases de efeito estufa.

Em fibras de madeira, as moléculas de lignina podem estar intimamente associadas às moléculas de carboidratos, em especial nos finos de pastas de alto rendimento. Nesses casos, o tempo para a biodigestão acaba tendo que ser maior, pois a digestão será mais lenta.

C. Digestão anaeróbica de resinas e extrativos da madeira

As árvores produzem resinas e extrativos para se defenderem de predadores (fungos, insetos, bactérias, etc.). Muitos extrativos são ricos em compostos polifenólicos, aldeídos, ácidos graxos, ácidos resínicos, terpenos, taninos e outros produtos de mais difícil biodegradabilidade. Em alguns casos, existem compostos extrativos e resínicos que inibem o metabolismo de microrganismos anaeróbicos.

Por essa razão, e como isso varia conforme o tipo de madeira, os efluentes das áreas de pátios de madeira e do descascamento de toras precisam de avaliações prévias antes de serem encaminhados

para tratamento anaeróbico. O mesmo acontece com os efluentes das fábricas de pastas mecânicas clássicas, onde a madeira é ralada ou desfibrada e o efluente pode ser rico em compostos que são solubilizados e extraídos da madeira.

Os extrativos e as resinas precisam ser avaliados com respeito, pois além de serem inibidores potenciais, eles podem gerar efluentes ácidos, fora dos limites favoráveis à digestão anaeróbica.

D. Digestão anaeróbica e compostos orgânicos de baixo peso molecular

Esses compostos costumam aparecer em produtos da decomposição enzimática natural ou acelerada (hidrólise) da madeira. São constituídos por ácidos orgânicos voláteis, álcoois, aldeídos, açúcares simples, etc.

Quase todos esses compostos são facilmente biodegradados pela digestão anaeróbica.

E. Digestão anaeróbica e compostos inorgânicos da polpação kraft

A polpação kraft possui em seus líquidos alta proporção de compostos inorgânicos contendo enxofre. Muito desse enxofre acabará se ligando a moléculas de lignina (lignina sulfatada), porém a maior parte se modificará. Ao final, nas águas efluentes do processo kraft, teremos razoáveis proporções de sulfetos, sulfatos, sulfitos, tiosulfatos, bem como compostos orgânicos como mercaptanas, etc.

Os íons oxidados de enxofre atuam como fonte de troca de elétrons e de oferta de oxigênio iônico para alguns tipos de organismos anaeróbicos. As bactérias redutoras de sulfato são as mais conhecidas - elas podem se tornar problemáticas, pois competem com as bactérias da metanogênese, por diversos substratos alimentícios (ácidos orgânicos voláteis, hidrogênio e metanol). Com isso, aumenta a produção de H₂S e reduz a de metano.

O gás sulfídrico em altas proporções causa mau odor e problemas de corrosão. Entretanto, os sistemas mais modernos permitem a separação do gás sulfídrico e o retorno do mesmo ao processo kraft, como fonte de enxofre. Esse retorno pode ser do gás sulfídrico tal qual, ou oxidado por combustão a dióxido de enxofre.

F. Digestão anaeróbica e efluentes de pátios de madeira e da lavagem e descascamento de toras

Os efluentes desses setores de qualquer tipo de fábrica de celulose são bastante semelhantes e contêm sólidos grosseiros como terra, areia, fragmentos de casca, galhos e folhas. Além disso, possuem dissolvidos diversos compostos orgânicos originados da madeira e casca: taninos, ácidos orgânicos (acético, butírico, fórmico, urônico, etc.), fenóis, compostos resínicos, amido, açúcares facilmente metabolizáveis, etc.

Conforme o tipo de madeira sendo utilizado e conforme a tecnologia e cuidados operacionais, esses efluentes podem oferecer ou não riscos de toxicidade aos microrganismos anaeróbicos. Ensaios preliminares de biodigestibilidade e toxicidade devem ser feitos para poder esclarecer isso, e delinear quais os eventuais cuidados e as ações a serem tomadas.

Mesmo que o efluente desse setor se mostre potencialmente biodegradável pela digestão anaeróbica, há que se ter o cuidado de proceder à separação desses sólidos grosseiros. Isso para tirar fora do sistema materiais que não sofrerão tratamento algum devido às dimensões e que podem causar transtornos operacionais aos reatores.

A grande vantagem de se tratar anaerobicamente esse efluente setorial é que a água tratada será bastante limpa e poderá retornar para a fábrica para ser tratada e suprida como água industrial. Com isso, pode-se fechar ainda mais o circuito de água dessas fábricas, com reduções nas quantidades de água a captar e de efluente a dispor.

G. Digestão anaeróbica e pastas de alto rendimento

Existem diversos processos para produção de pastas de alto rendimento.

Os processos mais simples são baseados apenas no uso de energia mecânica e vapor. São os processos que produzem as pastas mecânicas clássicas e as pastas termomecânicas. Com a abrasão e aquecimento do próprio atrito ou do vapor adicionado, ocorre o amolecimento da madeira e o desfibramento. Algum material se solubiliza nas águas de lavagem, que o efluente se enriquece também em finos de madeira e em fibrilas. Logo, esses efluentes se mostram ricos em hemiceluloses dissolvidas e hidrolisadas (principalmente xilanas), bem como em finos de madeira.

Os efluentes desses processos tipicamente mecânicos e termomecânicos mostram excelentes aptidões para serem tratados anaerobicamente. Entretanto, existem alguns tipos de madeira que são ricas em extrativos que podem eventualmente oferecerem riscos por toxicidade ou inibição do metabolismo celular. Aqui também se fazem necessários ensaios preliminares para identificar os níveis de biodegradabilidade e de toxicidade presentes. Em geral, a biodegradabilidade desses efluentes é média, com valores de relação DBO/DQO entre 0,3 a 0,6.

Se as partículas de sólidos suspensos forem diminutas, pode-se oferecer esse efluente tal qual para o tratamento anaeróbico, desde que o reator sendo usado assim o permita. Após o estágio de anaerobiose, o efluente pode ser clarificado em um decantador para remoção dos sólidos suspensos que serão tanto partículas de finos de madeira, parcialmente decompostos, como flocos de lodo, que acompanharam o efluente. Há que ser cuidado com a cor do efluente e com sua turbidez, pois há tendência de que células de microrganismos permaneçam no seio de líquido, aumentando esses testes e reduzindo a qualidade da água servida. Para melhorar a remoção de cor e de turbidez, pode ser necessário adicionar algum polímero ou floculante, para com isso se aumentar a floculação e a decantação dos corpos de bactérias que não decantam por suas características de finura e leveza.

O outro conjunto de processos de fabricação de pastas de alto rendimento inclui a adição de compostos "amolecedores" dos cavacos de madeira. Os processos mais comuns são: processo CTMP ("Chemi Thermo Mechanical Pulping"), com adição de sulfito de sódio e vapor; e processo APMP ("Alkaline Peroxide Mechanical Pulping"), com utilização de soda cáustica, peróxido de hidrogênio e vapor.

Essas pastas são de melhor qualidade e costumam sofrer alveijamento com produtos oxidantes (peróxido de hidrogênio) ou redutores (hidrossulfitos ou ditionitos de sódio). As pastas do grupo anterior também podem sofrer esse tipo de alveijamento, dependendo das finalidades às quais se destinam.

Os reagentes de amolecimento e de branqueamento podem incluir alguns aspectos qualitativos e quantitativos que merecem atenção para esses efluentes, pois poderemos ter:

- Maiores níveis de solubilizações de compostos da madeira (hemiceluloses, lignina, extrativos, resinas);
- Residuais de sulfitos, sulfatos e peróxidos;
- Residuais de soda cáustica e de reagentes de branqueamento;
- Partículas de sólidos suspensos como finos de madeira, fibrilas, etc.

Mais uma vez se fazem necessários ensaios de viabilidade técnica antes de se adquirir um sistema anaeróbico para esses efluentes. Conhecidos os eventuais problemas potenciais se podem incluir alguns tipos de pré-tratamento, como remoção de partículas, remoção ou inativação de resinas, eliminação de residuais de oxidantes ou redutores, etc.

Diversas instalações modernas e bem projetadas de pastas de alto rendimento estão operando com sistemas anaeróbicos para tratar seus efluentes – e com sucesso. Portanto, independentemente do potencial de toxicidade que eventualmente se possa encontrar nesse tipo de efluentes, a ciência e a tecnologia têm oferecido avanços que têm tornado esses sistemas anaeróbicos bastante efetivos para esse tipo de processos industriais de produção de pastas celulósicas.

H. Digestão anaeróbica e polpas solúveis pré-hidrólise kraft

A fabricação de polpas solúveis pode acontecer de duas formas principais: purificação alcalina de polpas sulfito ou digestão da madeira pelo processo pré-hidrólise kraft.

No caso do processo kraft com pré-hidrólise, os cavacos de madeira são inicialmente atacados por água quente em temperaturas e pressões elevadas (cerca de 170°C) para solubilização da maior fração possível das hemiceluloses. Esses carboidratos são facilmente hidrolisados nas condições ácidas que se desenvolvem pela solubilização e hidrólise dos radicais acetila e uronila das xilanas. A água quente inicia o ataque às ramificações das cadeias de hemiceluloses e rapidamente começa a agredir também a espinha dorsal da molécula ("backbone"). Formam-se grandes quantidades de ácido acético e ácido urônico que reduzem o pH do meio para valores próximos a 3,5.

Essa fase de pré-hidrólise, que antecede o cozimento kraft subsequente dos cavacos hidrolisados, costuma remover entre 15 a 20% do peso seco de madeira. Esse material orgânico enriquece de DQO e DBO o meio líquido, que se denomina usualmente de "pré-hidrolisado".

O pré-hidrolisado pode ser tratado pelo processo anaeróbico, desde que se ajuste seu pH para a neutralidade com algum condensado alcalino da evaporação e que se avaliem previamente a biodegradabilidade e os potenciais de toxicidade e inibitório do mesmo.

O potencial de geração de metano a partir desse líquido é bastante significativo, em especial levando em conta que atualmente a pré-hidrólise vem sendo feita com o mínimo de adição de água, o que acaba gerando pré-hidrolisados bastante concentrados em DQO.

A auto-hidrólise da madeira vem sendo conseguida com cavacos úmidos, de madeira verde, sem adição de água e apenas de vapor. Com isso, o pré-hidrolisado será produzido apenas com o condensado do vapor de aquecimento e da água utilizada para movimentação dos cavacos para e no digestor.

Atualmente, as fábricas de celulose pré-hidrólise kraft misturam esse pré-hidrolisado com o licor preto kraft da fase de polpação kraft e enviam a mistura para a evaporação e depois caldeira de recuperação. Isso acaba gerando enormes consumos de soda cáustica e de necessidades de vapor para evaporação de um líquido de baixo teor de sólidos. Esse processo permite recuperar o poder calorífico dos materiais orgânicos dissolvidos, mas a economicidade não é das melhores.

Já o potencial de se produzir metano para o empreendimento é algo a ser avaliado, caso existam fontes de consumo para o mesmo, como o forno de cal.

I. Digestão anaeróbica e polpa semiquímica NSSC

Existem diversas fábricas no mundo com produção de pastas semiquímicas pelo processo NSSC ("Neutral Sulfite Semichemical Pulping"). Algumas dessas fábricas evaporam o licor preto residual do cozimento e o destinam às seguintes finalidades:

- Venda a fábricas de celulose kraft como fonte de suprimento para a caldeira de recuperação (reposição de sais de sódio e energia);
- Evaporação e venda do licor concentrado como lignosulfonatos para uso em aplicações menos nobres (cura de concreto, etc.);
- Descarte como efluente ricamente contaminado em sais, íons e materiais orgânicos.

Existe certo nível de inibidores nos efluentes de fábricas NSSC, como íons sulfito e sulfato, além de metanol, residuais de oxidantes de produtos de alvejamento da pasta, etc. Portanto, qualquer iniciativa para se tratar anaerobicamente esses concentrados e problemáticos efluentes implicará em estudos prévios de viabilidade técnica e econômica. Confirmada a viabilidade, há que se estruturar a fábrica para ofertar ao sistema anaeróbico um efluente com qualidade homogênea, o que não é tão simples para esse tipo de fábricas, a maioria de pequeno porte e com idade tecnológica ultrapassada.

De qualquer forma, o sucesso ao tratar anaerobicamente esses efluentes complexos e ricos em DQO pode ser conseguido, mas demandará esforços, talento e tecnologias apropriadas.

J. Digestão anaeróbica e polpação kraft

Difícilmente uma fábrica de celulose kraft terá interesse ou encontrará viabilidade técnica e econômica para tratar seu licor preto residual de cozimento. Esse licor é altamente alcalino e rico em sais oxidados de enxofre, que favorecem as bactérias reductoras de sulfato, reduzindo a metanogênese. Por isso mesmo, é impossível se pensar em usar tratamento anaeróbico para licor preto de fábricas

kraft em operação, talvez apenas para eliminar o problema de lagoas antigas onde esse licor tenha sido acumulado de eras passadas.

Entretanto, as perdas de licor preto costumam acontecer regularmente em fábricas kraft, maior ainda em fábricas de mais de 15 anos de idade tecnológica. Essas perdas de licor preto podem contaminar os efluentes e são causadas por:

- ψ Lavagem da evaporação e da caldeira de recuperação;
- ψ Águas de lavagem da polpa não branqueada;
- ψ Condensados de ciclones de expansão do digestor;
- ψ Condensados da descarga do digestor;
- ψ Outros condensados sujos, etc.

A biodegradabilidade anaeróbica desses líquidos é de média a baixa, causada pela presença de moléculas complexas de fragmentos de lignina, metanol, extrativos de madeira, aldeídos, etc. Também ocorre muita concentração de íons oxidados de enxofre, que alteram a qualidade da microbiologia.

O biogás formado pode conter teores elevados de H₂S, mas se o sistema anaeróbico for bem projetado, poderá permitir a recuperação desse enxofre no próprio processo kraft, pelo reenvio do gás sulfídrico ao processo como fonte de reposição de enxofre.

K. Digestão anaeróbica e condensados da evaporação do licor preto kraft

Os condensados da evaporação do licor preto kraft se tornam bem mais propícios a serem tratados anaerobicamente após a destilação para remoção de metanol e de terebintina. A biodegradabilidade é razoável e existe bom potencial para se tratar a parte descartável desses condensados por processos anaeróbicos.

L. Digestão anaeróbica e polpação sulfito

A maior parte das fábricas de celulose sulfito ácido produzem lignosulfonatos a partir da lixívia residual do cozimento. Já as fábricas de celulose sulfito base magnésio ("processo magnefite") costumam recuperar o licor residual em caldeiras de recuperação, similares às usadas pelo processo kraft.

Com isso, a exemplo das fábricas kraft, somente existirão residuais de lixívia sulfito, que forem perdidos ao longo do processo de polpação. Essas perdas podem ser elevadas, pois muitas fábricas de celulose sulfito são antigas e com tecnologias não tão ecoeficientes.

As perdas podem acontecer como:

- Derrames de lixívia ou de lignosulfonatos;
- Águas de lavagem de polpas, pisos e outras águas assemelhadas;
- Condensados de ciclones, descarga do digestor, etc.

Os efluentes da polpação sulfito contêm altos teores de compostos sulfonados de lignina. Podem conter ainda: ácido acético, etanol, furfural, outros ácidos orgânicos voláteis e residuais de SO₂ livre e SO₂ combinado (bissulfitos).

Essa potencial presença de inibidores ao processo anaeróbico (sulfitos, bissulfitos, gás sulfídrico, furfural, etc.) precisa ser avaliada e esclarecida antes de se aplicar esse tipo de tratamento.

M. Digestão anaeróbica e condensados da evaporação da lixívia sulfito

Os condensados da evaporação da lixívia ou licor residual sulfito possuem alta biodegradabilidade, em função da presença de ácido acético (75%), etanol (5%), metanol (5%) e outros ácidos orgânicos voláteis.

Apesar desses pontos favoráveis, o tratamento desse efluente precisa do preenchimento de alguns quesitos:

- ↗ Neutralização, quase sempre com efluente alcalino do branqueamento ou da etapa de purificação da polpa sulfito para se fabricar polpa solúvel ou para dissolução;
- ↗ Mínimos teores de furfural, que tem potencial tóxico e pode se formar no processo;
- ↗ Mínimos teores de SO₂ livre e de íons bissulfito (HSO₃)⁻ e sulfito (SO₃)²⁻.

Caso a presença de enxofre for muito alta, o tratamento anaeróbico pode se tornar inapropriado pela excessiva geração de H₂S, que prejudica a qualidade do biogás e do meio ambiente (odor e corrosividade).

N. Digestão anaeróbica e branqueamento da celulose

Atualmente, a maior parte dos efluentes e do material orgânico enviado para tratamento nas ETE's provém da unidade de branqueamento da celulose, principalmente em modernas fábricas de celulose kraft.

Como o rendimento do branqueamento da celulose é de no mínimo 96% e pode atingir valores menores em fábricas que não possuem deslignificação com oxigênio, pode-se antever que entre 4 a 8% do peso seco da celulose não branqueada pode acabar saindo como matéria orgânica dissolvida ou como fibras perdidas nos efluentes do branqueamento. As perdas de fibras, finos e fibrilas para efluentes são comuns nesse setor (até 0,25% do peso seco de polpa), em função de muitas lavagens da polpa ao longo do branqueamento.

Os efluentes do branqueamento são ricos em moléculas degradadas de lignina e carboidratos (especialmente hemiceluloses). A composição dos açúcares degradados é muita diversa, mas isso não é problema, pois são facilmente degradados. A maior parte da DQO se deve aos compostos de baixo peso molecular (menores que 1.000 mg/mole.grama).

Também se notam extrativos de madeira e residuais de aditivos colocados no processo (surfactantes, talco, etc.).

Entretanto, os grandes problemas à biodegradabilidade são os residuais de oxidantes (ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio) e os compostos organoclorados de alto peso molecular. Esses compostos podem causar toxicidade e alguns são de grande recalcitrância ao tratamento.

Uma das alternativas interessantes para destruição dos residuais de oxidantes é a diluição do efluente do branqueamento com condensados da evaporação do licor preto kraft. Essa diluição e o ataque aos residuais de oxidantes tornam a mistura mais apta para o tratamento anaeróbico. Uma medida simples e muito eficaz, até mesmo porque os condensados da evaporação são naturalmente candidatos para tratamento anaeróbico. Podem ser usados percolados de aterros e de pátios de resíduos industriais para a mesma finalidade.

Em fábricas que ainda não possuem uma lavagem em contracorrente completa, podem-se separar os efluentes do branqueamento com maiores concentrações em DQO (dos dois primeiros estágios da sequência) para neutralização mútua e tratamento anaeróbico.

Existem alternativas e alternativas – cada caso merecerá suas próprias avaliações e estudos de melhores adequações.

O. Digestão anaeróbica e compostos organoclorados

Organoclorados em fábricas de celulose são compostos principalmente formados no branqueamento da celulose, quando se utilizam compostos de cloro como agentes oxidantes da lignina. Existem ainda organoclorados naturais sempre presentes nas águas e no ar e de outras rotas de formação, mas em baixíssimas concentrações.

O principal reagente de cloro hoje utilizado no branqueamento de celuloses de processos químicos é o dióxido de cloro (em sequências ECF – “Elementar Chlorine Free”), porém existem ainda no mundo fábricas de idade tecnológica mais atrasada e onde as restrições legais não são severas, que ainda usam cloro elementar e hipoclorito de sódio.

Os organoclorados são formados pela adição de cloro às moléculas dos extrativos da madeira e aos fragmentos da lignina.

Uma parte dos organoclorados apresenta certo nível de toxicidade, enquanto outra fração menor pode ter efeitos tóxicos, citotóxicos, mutagênicos e genotóxicos. Diversos tipos de industrialização e de processos naturais (combustão, por exemplo) podem gerar organoclorados. Até mesmo a cloração da água para dar potabilidade à mesma forma alguns tipos de organoclorados.

Por isso, o respeito e a atenção que se deve ter e dar aos compostos organoclorados, em especial a alguns deles como dioxinas, furanos, pentaclorofenol, dentre outros.

Em função dessas características e dos impactos potenciais ao meio ambiente e aos seres vivos, os organoclorados têm sido bastante estudados pela ciência e pelos desenvolvedores de tecnologias, para minimizar sua geração ou promover a sua destruição.

Os organoclorados em líquidos e polpas comerciais do setor de celulose e papel são medidos indiretamente pelo teste do AOX ("Adsorbable Organic Halogenated Compounds"), um teste que utiliza o carvão ativo para adsorção desses compostos organoclorados, retirando-os do efluente, para depois se separar os mesmos do carvão para quantificação.

Os microrganismos da digestão anaeróbica se comportam diferentemente em relação aos tipos de organoclorados. Os organoclorados menos tóxicos e de menores pesos moleculares podem ser eficientemente desalogenados pelos microrganismos anaeróbicos. A desalogenação consiste na remoção do íon cloreto da molécula do organoclorado. Com isso, o composto perde toxicidade e pode ser tornar um composto orgânico seguro, sem poder tóxico – porém às vezes, mantendo certo grau de recalcitrância.

Estudos indicam que a digestão anaeróbica de efluentes do branqueamento pode reduzir em 40 a 60% da carga de AOX desses efluentes. Essa desalogenação anaeróbica colabora para redução dos efeitos nocivos desses compostos, o que pode ser comprovado em testes biológicos como toxicidade aguda, crônica, genotóxica e mutagênica.

Em trabalho técnico resultante de uma pesquisa de mestrado apresentada na UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Edvins Ratnieks e Christine Gaylarde demonstraram que a concentração de organohalogenados presentes em lodo do tratamento de efluentes da fábrica de celulose kraft branqueada Riocell era reduzida em cerca de 50 a 60%, enquanto a redução da DQO (Demanda Química de Oxigênio) se reduzia entre 50 a 70%. A conclusão foi de que a degradação anaeróbica da matéria orgânica,

expressa como DQO ocorria praticamente nas mesmas proporções de degradação e desativação dos compostos organohalogenados. Entretanto, para que isso acontecesse nesses rendimentos, havia a necessidade de constante monitoramento e ajuste do pH, que mostrava máximos resultados entre 7 a 7,5. Em valores de pH abaixo de 6,5 ocorriam piores resultados nessa biodegradação e biodeterioração, fosse da DQO ou dos halogenados orgânicos.

Existem inúmeros estudos de pesquisa mostrando que os reatores anaeróbicos de alto desempenho (reatores de leito fluidizado, reatores híbridos, reatores IC, etc.) podem ter efeitos significativos na desalogenação de organoclorados. Existem referências de resultados de 80% de redução do AOX para esses reatores, com tempo de detenção hidráulico entre 12 a 24 horas.

A degradação de organoclorados de baixo peso molecular é uma das principais características positivas da digestão anaeróbica para o setor de celulose e papel. Para que isso aconteça, o efluente deve preencher todos os requisitos demandados por esse tipo de biodigestão, em especial não conter residuais tóxicos dos reagentes oxidativos do branqueamento.

Os compostos organoclorados que podem ser removidos mais eficientemente (em até 95%) são os seguintes:

- Diclorofenóis;
- Triclorofenóis;
- Dicloroguaiacol;
- Tricloroguaiacol;
- Tetraclorofenol;
- Tetracloroguaiacol.

Os mais resistentes à desalogenação são:

- Dioxinas;
- Furanos;
- Pentaclorofenol;
- Clorocatecóis.

Durante muito tempo se acreditou que os microrganismos anaeróbicos seriam extremamente sensíveis e de baixa tolerância aos

organoclorados. Inclusive, não se recomendava tratar efluentes do branqueamento da celulose por meios anaeróbicos. Com a evolução das tecnologias (processos de branqueamento ECF e ECF-Light) e da especialização da microbiologia, acabou-se descobrindo que a digestão anaeróbica precisa disso sim de que os residuais de compostos oxidantes do branqueamento sejam mínimos. Eles sim são os grandes vilões à anaerobiose. O consórcio de microrganismos é tolerante e ataca os organoclorados, mas resiste pouco aos residuais elevados de dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, hipoclorito de cálcio, cloro elementar e ozônio.

Os organoclorados com altos teores de cloro em moléculas mais pesadas são os mais difíceis de biodegradar. Alguns deles podem até mesmo mostrar elevada toxicidade aos microrganismos, sejam eles aeróbicos ou anaeróbicos. A toxicidade é quase sempre função da concentração do composto no meio líquido. Se um determinado organoclorado mostra toxicidade em um nível de concentração, pode não ser tóxico em concentrações muito mais baixas. Como as concentrações de organoclorados nos efluentes dos modernos sistemas de branqueamento são baixas, eles acabam não trazendo problemas de toxicidade e a digestão anaeróbica acaba acontecendo sem maiores dificuldades. Pelo contrário, acaba inclusive reduzindo os níveis de organoclorados pela desalogenação dos compostos mais fáceis de serem degradados.

Diversas pesquisas têm indicado que a biodegradação dos organoclorados pode ser potencializada pelo suplemento de alguns compostos que atuam como aceleradores da desalogenação. A glucose e o acetato podem atuar isolada ou conjuntamente como doadores de elétrons, facilitando a desalogenação de organoclorados pelos microrganismos anaeróbicos. Esses estudos industriais podem servir de base a misturas seletivas de efluentes – por exemplo, em fábricas de celuloses sulfito branqueadas que possuem geração de organoclorados, pode-se muito bem misturar o efluente do branqueamento com condensado da evaporação da lixívia sulfito, que é rico em ácido acético (acetato de hidrogênio). Com isso, potencializa-se a ação microbiológica anaeróbica no tratamento desses efluentes misturados.

Em caso de uso dos aceleradores de desalogenação, têm sido observados resultados de redução de AOX nos efluentes que estão entre 90 a 93%, uma notável conquista com redução de impactos ambientais desses efluentes após tratamento anaeróbico.

P. Digestão anaeróbica e peróxidos

Os peróxidos de hidrogênio e de sódio são oxidantes utilizados no branqueamento de celulose (pastas químicas, semiquímicas e de alto rendimento). São também utilizados nos processos quimotermomecânicos de polpação de alto rendimento (processo APMP).

Os residuais de peróxido são críticos para as bactérias, pois os peróxidos são antissépticos e bactericidas, inclusive utilizados na medicina curativa. Por essa razão, deve-se trabalhar com mínimos residuais de peróxidos nos efluentes, ou então se eliminar os mesmos com algum redutor. Ai pode entrar o perigo – eliminam-se residuais do oxidante peróxido e se deixam residuais do redutor empregado na neutralização.

Q. Digestão anaeróbica e lodos orgânicos das ETE's

A digestão anaeróbica pode reduzir pelo menos à metade (ou até a 1/3) o peso seco dos lodos orgânicos resultantes de outros tipos de ações tecnológicas nas fábricas de celulose e de papel. É uma ação muito interessante que tem sido cada vez mais cogitada para redução de custos de disposição de resíduos sólidos em fábricas do setor.

Outras vantagens importantes dessa prática:

- Potencialidade de geração de metano para uso como biocombustível na fábrica;
- Redução da toxicidade desses lodos causada pela presença de organoclorados;
- Redução das áreas de aterro industrial e das necessidades de equipamentos para manuseio e disposição desses lodos;
- Possibilidades de geração de um biofertilizante estabilizado para uso nas florestas da empresa, ou para venda para a agricultura.

R. Digestão anaeróbica e fabricação de papel

O tratamento anaeróbico de efluentes de fábricas de papel tem-se tornado cada vez mais popular, principalmente em fábricas de papéis reciclados. Nesse tipo de industrialização, aparas de papéis usados são desfibradas e as fibras secundárias são lavadas, destintadas, classificadas e alvejadas para reuso na fabricação de novas folhas de papel.

Como consequência desse tratamento, o efluente é bastante contaminado e contém tanto partículas sólidas como moléculas dissolvidas de amido, colas, açúcares, lignina, biocidas, enzimas, antiespumantes, etc. Conforme o tipo de aparas sendo trabalhadas, o conteúdo de cargas minerais (caulim, carbonato de cálcio, etc.) pode ser bastante elevado, bem como os residuais de tintas de impressão.

No caso de fábricas de papel integradas à fabricação da celulose, as perdas de fibras e de cargas minerais são bem menores. Também finos, fibrilas e conteúdos de materiais dissolvidos são menores. Por essa razão, devido ao fechamento de circuitos nessas fábricas, a tendência de utilização de tratamentos anaeróbicos de efluentes costuma ser também menor.

Praticamente todas as fábricas de papel precisam tratar seus efluentes, dando preferência por sistemas que permitam o retorno da água tratada de volta ao sistema. Com isso, o fechamento dos circuitos de água é melhorado e se reduzem os consumos unitários desse valioso e escasso insumo. O reciclo de água é mais facilmente conseguido em fábricas de papéis não branqueados e de papelão.

As fábricas de papéis brancos são exigentes por águas muito límpidas e sem cor e turbidez. Se a água mostrar essas características indesejáveis, o reciclo fica comprometido para essa finalidade.

Em praticamente todas as máquinas de papel existe acumulação de lixo químico dissolvido na água que recircula no processo. Essa sujeira tem aumentado muito com a intensificação do fechamento dos sistemas em relação ao uso de água. Esse lixo químico também se mistura a corpos de microrganismos que passam a viver nessas águas, formando um misto de lixo químico e biológico. O limo microbiológico começa a se depositar nos circuitos como biofilmes e esses costumam ser tratados com biocidas ou enzimas. Biocidas são venenos que tanto afetam esses microrganismos do limo, como também podem ser problemáticos para as colônias do tratamento anaeróbico de efluentes. Conforme a dosagem ou o tipo

de biocida, os residuais podem inviabilizar a adoção do tratamento biológico de efluentes (tanto aeróbico como anaeróbico).

Algumas fábricas de papéis reciclados usam peróxido de hidrogênio para alvejar suas fibras recicladas. Isso também pode ser um complicador para a microbiologia, como já vimos.

Quando o teor de biocidas e os de residuais de peróxidos permitirem, o tratamento anaeróbico desses efluentes pode ser uma excelente alternativa, inclusive com potencial para recuperação da água tratada.

O tratamento anaeróbico é bastante indicado para essas águas, que costumam serem quentes (acima de 45°C), ricas em sólidos suspensos e em materiais orgânicos dissolvidos. Até mesmo as fibras, fibrilas e finos celulósicos podem ser oferecidos como alimento para os microrganismos anaeróbicos, caso o tipo de reator e os conteúdos dos mesmos assim permitirem.

Não há necessidade de resfriamento do efluente e as condições de digestão anaeróbica termofílica podem ser as preferidas. Com o uso de tratamentos termofílicos, podem ser obtidos maiores rendimentos e maiores velocidades de tratamento, com economias nas operações, pela não necessidade de se ter que refrigerar os efluentes.

Muitas fábricas de papéis reciclados têm atingido excelentes rendimentos em redução de DBO (80 – 95%) e de DQO (60 – 80%), calculados com base em efluentes filtrados.

Após a etapa de digestão anaeróbica, o efluente poderá ir para um decantador, onde terá os sólidos suspensos remanescentes removidos (lodo orgânico, fibras e fibrilas, etc.). O lodo poderá ser enviado para aterro ou para compostagem. O efluente tratado poderá ser reciclado de volta ao processo ou enviado para o corpo receptor.

Como o tratamento biológico anaeróbico consome e degrada muita DBO, DQO, nutrientes, compostos potencialmente acumulativos do efluente e também reduz a patogenicidade do mesmo, a água assim tratada pode ter boas potencialidades para retorno ao processo.

Existem outras vantagens para o uso do tratamento anaeróbico em fábricas de papéis reciclados:

- Redução do odor fétido muito comum e devido às águas altamente contaminadas do processo de preparação de fibras secundárias;

- Produção de metano para uso como biocombustível para geração de calor para a fábrica.

Em certos casos, a fábrica de papel reciclado pode se aliar à municipalidade do local onde se encontra instalada para receber e tratar o efluente sanitário da cidade, em um processo de codigestão que vai fornecer maior geração de metano e aumentar a quantidade de água que talvez possa ser retornada à fábrica. Nesses casos, talvez se faça necessária a desinfecção da água tratada para o uso da mesma no processo fabril.



Inesquecível amigo Gastão Campanaro reciclando papel em uma oficina artesanal

S. Digestão anaeróbica e resultados no setor de celulose e papel

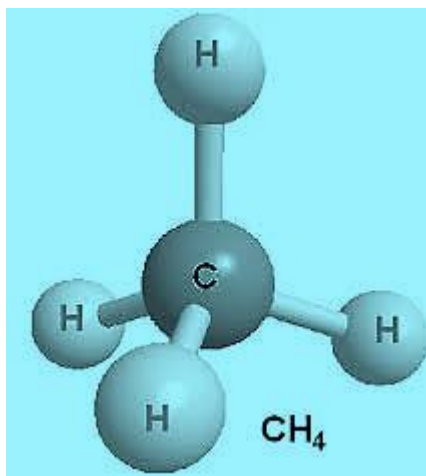
Para efeitos de comparações de resultados frequentes que vêm sendo relatados para aplicações anaeróbicas em efluentes de fábricas de celulose e papel, foi construída uma tabela com dados que podem variar muito, mas que conseguem dar uma aproximação do que costuma acontecer nesse setor industrial.

Tipo de efluente	Concentrações típicas - DQO (ppm)	Redução DQO (%)
Fábricas TMP e pastas mecânicas clássicas	2.000 a 6.000	60 - 85
Fábricas CTMP e APMP	2.500 a 15.000	45 - 70
Condensados da evaporação sulfito	7.000 a 40.000	40 - 80
Condensados da evaporação kraft	3.000 a 30.000	55 - 75
Licores sulfito e sulfito neutro	120.000 a 220.000	Sem dados
Branqueamento celulose química	500 a 2.000	30 a 65%
Lodo do tratamento biológico	80 a 95% de matéria orgânica	40 - 65

Enfim amigos, oportunidades e resultados existem e estão relatados para o setor em inúmeras fábricas no planeta. É então só uma questão de avaliações, tomadas de decisão e implementações.



CONSIDERAÇÕES FINAIS



Molécula de metano

Frente às dezenas de aplicações bem sucedidas de processos anaeróbicos no setor de celulose e papel, não existem dúvidas de que essa tecnologia poderá ser cada vez mais usada em fábricas desse setor industrial. Esse crescimento possivelmente acontecerá mais nas fábricas de papéis reciclados, nas fábricas de celulose sulfito e nas fábricas de pastas de alto rendimento. As fábricas de pastas kraft (branqueadas e não branqueadas) e as fábricas integradas de fabricação de papel têm sido mais cautelosas em usar esses processos, até mesmo pela cultura aeróbica vigente nas mesmas.

A possibilidade de usar incentivos estimuladores relativos ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) possibilitará que muitos empresários se interessem pela substituição de algum combustível fóssil por biocombustíveis renováveis – e o biogás gerado na anaerobiose é uma excelente alternativa a considerar. Isso é bastante interessante para fábricas de pequeno e médio porte. Mas também é muito válido para grandes empresas de celulose e papel, que terão maiores quantidades de biogás para uso interno.

Os processos anaeróbicos serão também particularmente interessantes em tratamentos de efluentes setoriais ricos em carga orgânica e também para estabilização e redução de peso de lodos orgânicos que hoje resultam como resíduos sólidos.

Uma das vantagens do processo anaeróbico é que ele pode ocorrer em condições termofílicas (entre 45 a 65°C) sem necessidade de se ter que reduzir a temperatura de muitos efluentes quentes gerados pelo setor de celulose e papel. Também geram menos lodo, usam menos eletricidade e menos nutrientes – em resumo, gastam

menos e também produzem um biocombustível valioso que é o biogás.

Acredito que existam seis tendências para o incremento da utilização dos processos anaeróbicos no setor de celulose e papel:

1. Tratamento de efluentes líquidos altamente contaminados em material orgânico (tratamento "kidney" de algum efluente de alta concentração em DQO e /ou DBO);
2. Associação do tratamento anaeróbico a outros tipos de tratamentos, como por exemplo, os processos híbridos anaeróbico/aeróbico.
3. Tratamento de águas de fácil biodegradabilidade e que permitam a recuperação e reuso da mesma após o tratamento;
4. Redução da quantidade de resíduos sólidos orgânicos pela decomposição anaeróbica de lodos pastosos;
5. Produção de biogás para uso combustível na própria unidade geradora do mesmo;
6. Implantação de sistemas híbridos anaeróbico/aeróbico para tratar efluentes, aproveitando as vantagens inerentes aos processos anaeróbicos e reduzindo os problemas comuns em processos aeróbicos (como a formação de lodo filamentososo ou "bulking"). Com essa filosofia, talvez se trate anaerobicamente apenas os líquidos que mereçam serem tratados dessa forma, fortalecendo assim o conceito de tratamentos "kidney".



As cartas estão então na mesa: resta começar o jogo para alguns e para outros, apenas continuar a reforçar o aprendizado e colher melhor os frutos da experiência e das tecnologias anaeróbicas aperfeiçoadas, associadas ou não aos processos aeróbicos.



Gostaria de dizer ao término desse texto, que foi um privilégio ter podido escrever e lhes oferecer esse capítulo do **Eucalyptus Online Book**. Ele foi criado a partir da condensação de inúmeros conhecimentos tecnológicos aplicados ao setor de celulose e papel em alguns de seus diversos e variados componentes ambientais. Seu foco é o tratamento de efluentes por processos biotecnológicos de natureza anaeróbica, mais de forma integrada a outros processos do que com o objetivo de serem esses processos os únicos e capazes de resolverem isoladamente os problemas ambientais sobre efluentes líquidos. Não quisemos em momento algum colocar esses processos como alternativas únicas. Procuramos, em verdade, apresentar vantagens, desvantagens, oportunidades, potenciais e tendências sobre esses tipos de tratamentos de efluentes para o setor de base florestal.

Também tem o objetivo de criar uma fonte aberta de informações públicas, com dezenas de ótimas referências da literatura, para que qualquer cidadão possa entender melhor os conceitos biotecnológicos básicos relacionados ao tratamento de efluentes tendo por base os processos anaeróbicos.

Esse texto tem como uma de suas virtudes a discussão aberta e compartilhada sobre diversas oportunidades anaeróbicas para o setor de celulose e papel, que hoje não têm sido muito aproveitadas por esse setor, mas que possuem enormes potenciais de utilização. O capítulo pode também se constituir em fonte de conhecimentos e embasamento técnico para outras empresas afins da base florestal (produção de painéis de madeira, serrarias, mobiliário, etc.).

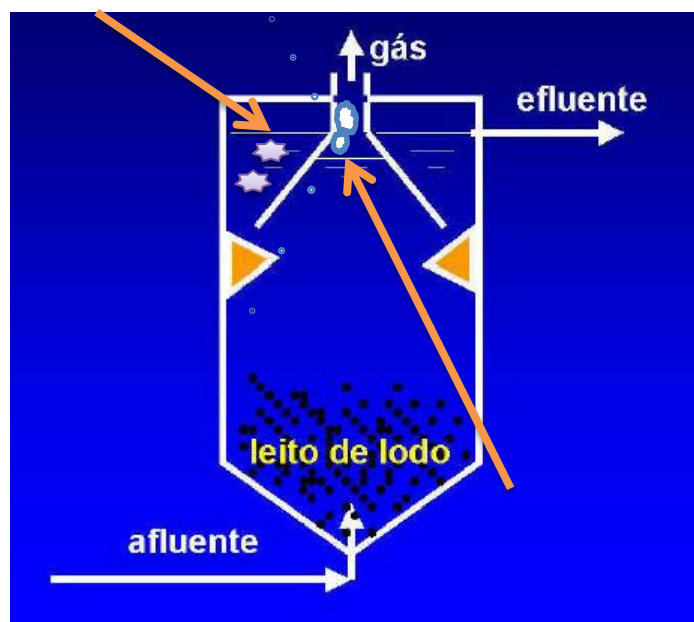
Procurei nesse capítulo integrar fundamentos tecnológicos e biológicos com aplicações práticas operacionais e de gestão da ecoeficiência nesse setor. É um condensado autêntico e didático de

tudo que classifiquei de importante para aqueles que estão interessados em conhecer e aprender mais sobre esses tipos intrigantes de biotecnologia para dar um destino justo e produtivo a alguns de seus efluentes e resíduos orgânicos da linha industrial.

Espero que o que escrevi possa lhes ser de utilidade, estimados amigos leitores.



REFERÊNCIAS DA LITERATURA E SUGESTÕES PARA LEITURA



Reator anaeróbico de manta de lodo com fluxo ascendente
Observar a inventividade da tecnologia para separação de gases e para decantação e retorno do lodo (SSV's) ao reator.

A literatura global sobre o tratamento anaeróbico de efluentes é bastante vasta, mesmo para o caso específico de efluentes da indústria de celulose e papel. Com muita facilidade se pode compor um universo de centenas de bons artigos, mas isso acabaria se afastando do propósito inicial desse nosso capítulo, que é a objetividade e a praticidade aos leitores. Por isso, procuramos selecionar um conjunto de textos valiosos e apropriados a esse cenário. Aproveitamos a oportunidade para relacionar um número importante de artigos e palestras de eventos e revistas da nossa

ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, pois estão definitivamente relacionados à própria história do crescimento da biotecnologia ambiental a partir dos anos 80's, quando ela passou a se instalar com mais significância no Brasil.

Com isso, identificamos cerca de uma centena de bons artigos, palestras e websites que podem com facilidade orientar qualquer leitor que eventualmente deseje se aprofundar na temática que estamos cobrindo nesse capítulo. Caso os leitores tenham necessidades adicionais, podem perfeitamente obter complementações através da utilização de ferramentas de busca na web.

É muito importante que vocês naveguem logo e façam os devidos *downloading's* dos materiais de seu interesse nas nossas referências de euca-links. Muitas vezes, as instituições disponibilizam esses valiosos materiais por curto espaço de tempo; outras vezes, alteram o endereço de referência em seu website. De qualquer maneira, toda vez que ao tentarem acessar um link referenciado por nossa newsletter e ele não funcionar, sugiro que copiem o título do artigo ou evento e o coloquem entre aspas, para procurar o mesmo em um buscador de qualidade como Google, Bing, Yahoo, etc. Às vezes, a entidade que abriga a referência remodela seu website e os endereços de URL são modificados. Outras vezes, o material é retirado do website referenciado, mas pode eventualmente ser localizado em algum outro endereço, desde que buscado de forma correta.

Espero que naveguem com determinação em muitos desses valiosos textos e websites. Tenho a esperança que eles lhes possam ser de muita utilidade.

Vejam o que lhes reservamos:

My anaerobic sustainability story. G. Lettinga. Acesso em 25.11.2014:

<http://www.leaf-wageningen.nl/web/file?uuid=c82e8723-8733-4633-bfd0-204cb385ee80&owner=89be6e83-0814-4a02-ae1a-7bd40261407a> ("Preview" - em Inglês)

e

<http://www.dutchwatersector.com/news-events/news/11143-biography-professor-gatze-lettinga-my-anaerobic-sustainability-story.html> (Como comprar? - em Inglês)

LeAF – Lettinga Associates Foundation – Wageningen University & Research Center. Acesso em 25.11.2014:

<http://www.leaf-wageningen.nl/en/leaf/Publications/Public-Reports.htm>
(Publicações - em Inglês e Holandês)

e

<http://www.leaf-wageningen.nl/en/leaf/Lettinga-Award.htm> (Premiação Lettinga a trabalhos e pesquisadores orientados para a digestão anaeróbica – em Inglês)

Gatze Lettinga’s publications. Researchers’ groups websites. Acesso em 25.11.2014:

http://www.researchgate.net/profile/Gatze_Lettinga (em Inglês)

e

<http://academic.research.microsoft.com/Author/12898467/gatze-lettinga> (em Inglês)

Anaerobic treatment in paper industry. Pesquisa de vídeos. Vídeos YouTube. Acesso em 15.11.2014:

https://www.youtube.com/results?search_query=%22anaerobic+treatment%22+paper+industry (em Inglês)

Lectures Series on Water & Waste Water Engineering. C. Venkobachar; L. Philip; B.S. Murty. Indian Institute of Technology. Vídeos. Acesso em 15.11.2014:

http://dcw-sample.appspot.com/IIT_Madras_Department_of_Civil_Engineering_Prof._C._Venkobachar,_Prof._Ligy_Philip,_Prof._B._S._Murty.html (em Inglês)

Biotecnologia – Ensino e divulgação. M.A.M. Malajovich. Website especializado. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.bteduc.bio.br/>

Biogás – Reatores. CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biog%C3%A1s/20-Reatores>

Ecocell – Projetos e Consultoria Ambiental. Website especializado. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.ecocell.com.br/> (Website)

Anaerobic treatment of effluents in the pulp and paper industry. USEPA – United States Environmental Protection Agency. Literature Search. Acesso em 15.11.2014:

<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe?User=ANONYMOUS&Password=anonymous&Client=EPA&SearchBack=ZyActionL&ZyAction=ZyActionS&Toc=&TocEntry=&TocRestrict=n&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&Docs=&IntQFieldOp=&ExtQFieldOp=&MaximumPages=1&Query=%22anaerobic+treatment%22+pulp+paper+industry+effluents&SearchMethod=2&FuzzyDegree=0&Index=2011+Thru+2015&Index=1995+Thru+1999&Index=1981+Thru+1985&Index=2006+Thru+2010&Index=1991+Thru+1994&Index=1976+Thru+1980&Index=2000+Thru+2005&Index=1986+Thru+1990&Index=Prior+to+1976&Index=Hardcopy+Publications&DefSeekPage=x&MaximumDocuments=15&SortMethod=h&SortMethod=-&Display=p&ImageQuality=r65g4%2Fr65g4%2Fxl50y150g16%2Fi360&Display=f> (em Inglês)

Anaerobic digestion. USEPA – United States Environmental Protection Agency. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.epa.gov/agstar/anaerobic/index.html> (em Inglês)

e

<http://www.epa.gov/agstar/anaerobic/ad101/anaerobic-digesters.html> (“Anaerobic digesters” – em Inglês)

Tratamento biológico de água, efluentes e esgotos – Filtros e reatores aeróbios e anaeróbios. Naturaltec. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.naturaltec.com.br/Tratamento-Agua-Reator-Biologico-Teoria.html>

Tratamento de água. Website especializado. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.tratamentodeagua.com.br/> (Website)

e

<http://www.tratamentodeagua.com.br/R10/Perfil.aspx?codigo=24> (Bibliografias em tratamento de água e efluentes)

e

http://www.tratamentodeagua.com.br/R10/Lib/Image/art_1168947454_cap-4.pdf (Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios com reatores de biofilme)

e

http://www.tratamentodeagua.com.br/R10/Lib/Image/art_2096745470_cap-3.pdf (Pós-tratamento de efluentes anaeróbios por lagoa de polimento)

e

http://www.tratamentodeagua.com.br/R10/Lib/Image/art_252764564_Cap-2.pdf (Pós-tratamento de efluentes anaeróbios por aplicação no solo)

Anaerobic wastewater treatment. J.B. van Lier; N. Mahmoud; G. Zeeman. Online Course on Biological Wastewater Treatment – Principles, Modeling and Design. Acesso em 15.11.2014:

http://www.researchgate.net/publication/238792345_Online_Course_on_Biological_Wastewater_Treatment_Principles_Modeling_and_Design/file/e0b49527145c8e2eeb.pdf (em Inglês)

UASB reactor. Sustainable Sanitation and Water Management. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.sswm.info/category/implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/semi-centralised-wastewater-treatments/u> (em Inglês)

e

<http://www.sswm.info/print/769?tid=859> (em Inglês)

Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). Microbewiki. Acesso em 15.11.2014:

http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Upflow_Anaerobic_Sludge_Blanket (em Inglês)

Biodegradation tests. RSA – Respirometer Systems and Applications. Acesso em 15.11.2014:

http://www.respirometer-sys.com/index.php?option=com_content&view=article&id=20:biodegradation-tests&catid=14:applications&Itemid=31 (em Inglês)

PAQUES. Anaerobic treatment and biogas production. Acesso em 15.11.2014:

<http://en.paques.nl/> (Website – em Inglês)

e

<http://en.paques.nl/about-us/cases> (Estudos de casos com tratamentos anaeróbicos – em Inglês)

e

<https://www.youtube.com/watch?v=3qBbTNyDfD8> (“Paques in pulp and paper industry” – em Inglês)

Aplicações anaeróbicas em celulose e papel. PAQUES Water Systems. Acesso em 15.11.2014:

<http://br.paques.nl/seu-setor/featured/celulose-e-papel>

Anaerobic COD removal. PAQUES Water Systems. Acesso em 15.11.2014:

<http://en.paques.nl/applications/featured/anaerobic-cod-removal> (em Inglês)

e

<http://en.paques.nl/about-us/cases/norske-skog-en/3> (Case Nork-Skog, Noruega - em Inglês)

e

<http://en.paques.nl/about-us/cases/cartonneries-de-gondardennes-en/3> (Case Cartonneries de Gondardennes, França - em Inglês)

e

<http://en.paques.nl/about-us/cases/tembec-en/3> (Case Tembec, Canadá - em Inglês)

e

<http://en.paques.nl/about-us/cases/nine-dragons-en/3> (Case Nine Dragons, China - em Inglês)

e

<http://en.paques.nl/about-us/cases/saica-en/3> (Case Saica, Europa - em Inglês)

e

<http://en.paques.nl/about-us/cases/smurfit-kappa-en/3> (Case Smurfit Kappa - em Inglês)

Anaerobic treatment technologies. Veolia Water Technologies. Acesso em 15.11.2014:

<http://veoliawatertechnologies.com/AnaerobicTreatment/en/> (em Inglês)

Anaerobic biological treatment. Degrémont Industry. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.degreumont-industry.com/en/our-expertises-technologies/wastewater/anaerobic-biological-treatment/> (em Inglês)

Water biological treatment systems. Waterlau. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.waterleau.com/en/technologies/water> (em Inglês)

Automatic methane potential test system. Bioprocess Control. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.environmental-expert.com/products/automatic-methane-potential-test-system-ampts-ii-70718> (em Inglês)

Anaerobic treatment in pulp and paper industry. A.M. Springer. Miami University – Ohio. Apresentação em PowerPoint: 23 slides. Acesso em 15.11.2014:

<http://www.users.miamioh.edu/springam/anaerobicbiological/sld001.htm> (em Inglês)

Página personal del professor José Luis Sanz. UAM - Universidad Autónoma de Madrid. Acesso em 15.11.2014:

<http://www2.cbm.uam.es/jlsanz/> (em Espanhol)

e

<http://www2.cbm.uam.es/jlsanz/investigacion/inhibicion.htm> ("Inhibición" - em Espanhol)

Aplicações da biotecnologia em processos ambientais da fabricação de celulose kraft e de papel de eucalipto: Compostagem de resíduos e geração de biogás. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 35. 152 pp. (2014)

http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT35_Compostagem_Residuos_Biogas.pdf

Aplicações da biotecnologia em processos ambientais da fabricação de celulose kraft e de papel de eucalipto: Processos aeróbicos por lodos ativados para tratamento de efluentes. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 34. 229 pp. (2014)

http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT34_Lodos_Ativados.pdf

Tratamento de esgotos e geração de energia. E.P. Jordão. GMI – Global Methane Initiative. Workshop de Boas Práticas na Agropecuária, Resíduos Sólidos Urbanos e Esgotamento Sanitário. Apresentação em PowerPoint: 47 slides. (2014)

<http://gmi.fatma.sc.gov.br/uploads/10.mww.2.Eduardo.pdf>

Compendium of sanitation systems and technologies. E. Tilley; L. Ulrich; C. Lüthi; P. Reymond; C. Zurbrügg. IWA – International Water Association & EAWAG – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. 180 pp. (2014)

http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/compendium_e/index_EN
(em Inglês)

e

<http://ecompendium.sswm.info/> (em Inglês)

e

http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/sesp/dl/compendio_sp.pdf
(em Espanhol)

e

<http://www.sswm.info/sites/default/files/ecomprint/TILLEY%20et%20al%202014%20T-11%20Upflow%20Anaerobic%20Sludge%20Blanket%20Reactor%20UASB.pdf>
(Reator UASB – "Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor" - em Inglês)

e

<http://www.sswm.info/sites/default/files/ecomprint/TILLEY%20et%20al%202014%20T-3%20Anaerobic%20Baffled%20Reactor%20ABR.pdf> (Reator ABR – “Anaerobic Baffled Reactor” – em Inglês)

e

<http://www.sswm.info/sites/default/files/ecomprint/TILLEY%20et%20al%202014%20S-11%20Anaerobic%20Filter.pdf> (“Anaerobic filter” – em Inglês)

e

<http://www.sswm.info/sites/default/files/ecomprint/TILLEY%20et%20al%202014%20S-12%20Biogas%20Reactor.pdf> (“Biogas reactor” – em Inglês)

Techniques for waste water treatment in different paper mills.

A. Reichart. German Federal Environment Agency. Apresentação em PowerPoint: 23 slides. (2013)

http://www.igep.in/live/hrdpmp/hrdpmaster/igep/content/e48745/e49028/e58182/e58187/waste_water_treatment_PP_2013.pdf (em Inglês)

Biotecnologia ambiental. M.C. Cammarota. UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 109 pp. (2013)

http://www.eq.ufrj.br/docentes/magalicammarota/2013/apostila_eqbB365.pdf

Avaliação da biotratabilidade do efluente de branqueamento de polpa celulósica por processos aeróbios e anaeróbios.

M.C.S. Amaral; L.H. Andrade; L.C. Lange; C.P. Borges. Engenharia Sanitária e Ambiental 18(3): 253 – 262. (2013)

<http://www.scielo.br/pdf/esa/v18n3/1413-4152-esa-18-03-00253.pdf>

Tratamento físico-químico para efluente de CTMP. M.B. Grötzner; L.H. Schroeder; D.M. Braga; S.H.S. Martinelli; O. Pikka; C.R. Xavier. 46º Congresso Internacional. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 16 pp. (2013)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/2013_TRATAMENTO_PARA_EFLUENTE.pdf

Estudos de viabilidade de tratamento de efluente de indústria de celulose kraft por reator biológico com leito móvel (MBBR).

S.C. Vanzetto. Dissertação de Mestrado. UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 53 pp. (2012)

http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/333/1/CT_PPGCTA_M_Vanzetto,%20Suelen%20Cristina_2012.pdf

Critical overview of water consumption in the pulp & paper industry. C. Foelkel. Seminário Kemira. Apresentação em PowerPoint: 25 slides. (2011)

<http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/Palestras/Water%20in%20Pulp%20and%20Paper%20Industry.pdf> (em Inglês)

Anaerobic treatment of industrial effluents: An overview of applications. M.E. Ersahin; H. Ozgun; R.K. Dereli; I. Ozturk. Intechopen. 27 pp. (2011)

<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/14547.pdf> (em Inglês)

Validação de método para determinação de ácidos orgânicos voláteis em efluentes de reatores anaeróbios empregando cromatografia líquida. M.B.R. Cerqueira; A.N. Dias; S.S. Caldas; F.B. Santana; M.G. Montes D'Oca; E.G. Primel. Química Nova 34(1): 156 – 159. (2011)

http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol34No1_156_28-NT10227.pdf

Construção de reatores anaeróbios de fluxo ascendente em escala experimental utilizando materiais recicláveis. C.A. Proença; L.A. Fernandes. Trabalho de Conclusão de Curso. FATEC – Faculdade de Tecnologia de Piracicaba. 58 pp. (2011)

http://www.fatecpiracicaba.edu.br/TG_2011_1/TG_2011_1_05.pdf

Anaerobic treatment of cellulose bleach plant wastewater: chlorinated organics and genotoxicity removal. T. R. Chaparro; E. C. Pires. Brazilian Journal of Chemical Engineering 28(4): 625 - 638. (2011)

<http://www.scielo.br/pdf/bjce/v28n4/a08v28n4.pdf> (em Inglês)

Química verde no Brasil: 2010 – 2030. F.C.R. Assunção; J.O.B. Carioca; M.F.L. Almeida; P.R. Seidl; D.A. Silva Filho; E.F. Medeiros. CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 436 pp. (2010)

http://www.cgEE.org.br/publicacoes/quimica_verde.php

ABSTRACT: Low effluent recycled paper mills. B. Allender; G. Covey; D. Shore. Appita Journal 63(3): 186 – 189. (2010)

<http://search.informit.com.au/documentSummary;dn=128288988726727;res=IELENG> (em Inglês)

Anaerobic digestion of wastewater. Lettinga Associates Foundation. Global Methane Initiative – Wastewater Task Force Meeting. Apresentação em PowerPoint: 54 slides. (2010)

https://www.globalmethane.org/documents/events_combined_20101111_perspectives_from_the_european_union.pdf (em Inglês)

Manual de operação e manutenção da estação de tratamento de efluentes da EMBRAPA Agroindústria de Alimentos. E.M. Penha; A.M. Souza; M.C.P.A. Santiago; B.R. Cendon; R.R.B. Silva. Embrapa Agroindústria de Alimentos. Documentos 106. 25 pp. (2010)

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/75005/1/pub-202.pdf>

Tratamento de efluentes de branqueamento de polpa celulósica em reator anaeróbico seguido de processo oxidativo avançado. A.T.R. Chaparro. Tese de Doutorado. USP – Universidade de São Paulo. 248 pp. (2010)

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-14042010-153657/publico/AdelaTatiana.pdf>

Tratamento anaeróbico de efluentes - Um caso bem sucedido na Pirassununga S.A. J.L. Papa; M.A.J. Orozco. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 15 pp. (2010)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Tratamento_anaerobico_efluentes_Pirassununga.pdf

e

<http://www.acquaeng.com.br/wp-content/uploads/2010/01/tae.pdf>

Recent developments in biogas production from pulp and paper industry wastewaters. K. Cirik; V. Ozdemir; E. Yazar; O. Cinar. Kahramanmaraş Sutcu İmam University. 08 pp. (2010)

http://eprints.ibu.edu.ba/607/1/issd2010_science_book_p598-p605.pdf (em Inglês)

Use of Biochemical Methane Potential (BMP) assays for predicting and enhancing anaerobic digester performance. L. Moody; R. Burns; W. Wu-Haan; R. Spajiš. 44th Croatian and 4th International Symposium of Agriculture. 05 pp. (2009)

<http://sa.pfos.hr/sa2009/radovi/pdf/Radovi/r10-009.pdf> (em Inglês)

Waste water in the pulp and paper industry. Today and in retrospect. C.H. Möbius. PTS Water and Environment Technology Symposium. 13 pp. (2009)

http://www.cm-consult.de/download/183_m2902.pdf (em Inglês)

Upflow anaerobic filter for the degradation of adsorbable organic halides (AOX) from bleach composite wastewater of pulp and paper industry. N.S. Deshmukh; K.L. Lapsiya; D.V. Savant; S.A. Chiplonkar; T.Y. Yeole; P.K. Dhakephalkar; D.R. Ranade. *Chemosphere* 75: 1179 – 1185. (2009)

[http://www.researchgate.net/profile/Devayani_Savant/publication/24240334_Upflow_anaerobic_filter_for_the_degradation_of_adsorbable_organic_halides_\(AOX\)_from_bleach_composite_wastewater_of_pulp_and_paper_industry/links/02e7e5385acfc9220d000000](http://www.researchgate.net/profile/Devayani_Savant/publication/24240334_Upflow_anaerobic_filter_for_the_degradation_of_adsorbable_organic_halides_(AOX)_from_bleach_composite_wastewater_of_pulp_and_paper_industry/links/02e7e5385acfc9220d000000) (em Inglês)

Manual de procedimentos de coleta e metodologias de análise de água. M.E. Rolla; S.M. Ramos; M.D. Carvalho; H.R. Mota; A.C.P.P. Almeida. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. 87 pp. (2009)

http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/ambientais/Biodiversidade/Documents/SISAGUA.pdf

Capítulo IX: Tecnologias limpias. E. González Suárez. In: "Panorama de la Industria de Celulosa y Papel en Iberoamérica 2008". M.C. Area. RIADICYP. 44 pp. (2008)

<http://www.riadicy.org/images/stories/Libro/capituloix.pdf> (em Espanhol)

Capítulo X: La industria de pulpa y papel y el medio ambiente. M.C. Area; C.R. Antúnez; P. Mutje; M.A. Pelach. In: "Panorama de la Industria de Celulosa y Papel en Iberoamérica 2008". M.C. Area. RIADICYP. 51 pp. (2008)

<http://www.riadicy.org/images/stories/Libro/capituloX.pdf> (em Espanhol)

Ecoeficiência e produção mais limpa para a indústria de celulose e papel de eucalipto. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 09. 86 pp. (2008)

http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT09_ecoeficiencia.pdf

Oportunidades para ecoeficácia, ecoeficiência e produção mais limpa na fabricação de celulose kraft de eucalipto. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 10. 92 pp. (2008)

http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT10_ecoeficiencia.pdf

Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos. M. Dezotti. Série Escola Piloto de Engenharia Química. 360 pp. (2008)

<http://books.google.com.br/books?id=-M3dQhS2sccC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>

e

http://www.e-papers.com.br/produtos.asp?codigo_produto=1495 (Endereço para aquisição do livro)

Aplicação de processo oxidativo avançado H₂O₂/UV como pós-tratamento de reator anaeróbio em efluentes de indústrias de celulose kraft branqueada. D.B. Ruas. Dissertação de Mestrado. USP – Universidade de São Paulo. 137 pp. (2008)

http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19052008-104235/publico/Dissertacao_Diego.pdf

Tratamento da água branca por biorreator anaeróbio convencional e biorreator anaeróbio a membranas. A.P.S. Loures; C.M. Silva; M.R. Coara; I.L.H. Morais. O Papel (Março): 77 - 92. (2008)

http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1312202815_c628d4f486b4a39f1d48dd8cb309e36c_957350935.pdf

Comparing aerobic and anaerobic wastewater treatment processes for papermill effluent considering new developments. A. Helble; C.H. Möbius. Zellcheming General Meeting. 23 pp. (2008)

http://www.cm-consult.de/download/181_m2802.pdf (em Inglês)

Tratamento anaeróbico de efluentes de máquina de papel por biorreator convencional e biorreator de membranas. A.P.S. Loures. Tese de Doutorado. UFV – Universidade Federal de Viçosa. 127 pp. (2007)

http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_arquivos/3/TDE-2008-05-14T124736Z-1153/Publico/texto%20completo.pdf

Aerobic vs. anaerobic-aerobic biotreatment: paper mill wastewater. M. Lerner; N. Stahl; N. Galil. Environmental Engineering Science 24(3): 277 - 85. (2007)

<http://cee.technion.ac.il/eng/getfile.asp?LNGID=1&DBID=1&GID=369> (em Inglês)

Tratamento da água branca por biorreator anaeróbico convencional e biorreator anaeróbico a membranas. A.P.S. Loures; C.M. Silva; M.R. Coura; I.L.H. Morais. 40º Congresso Anual. ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Apresentação em PowerPoint: 33 slides. (2007)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/2007_Tratamento_agua_branca_biorreator_anaerobico.pdf

Water use and wastewater treatment in papermills. C.H. Möbius. 113 pp. (2006)

http://www.cm-consult.de/download/wwtp_read_only_2.pdf (em Inglês)

Tratamento anaeróbio de efluentes. F. Schmitt; S. Weschenfelder; T.M. Vidi. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. 60 pp. (2006)

<http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/135499430272/39783985.html>

e

http://www.eng.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/trabalhos_grad/trabalhos_grad_2006-1/tratamento_anaerobio.doc

Processo anaeróbio conjugado com processos oxidativos avançados (POA) no tratamento dos efluentes do processo industrial de branqueamento da polpa celulósica. T.J. Momenti. Tese de Doutorado. USP – Universidade de São Paulo. 140 pp. (2006)

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-22032007-205656/publico/Tese.pdf>

The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. R.C. Leitão; A.C. van Haandel; G. Zeeman; G. Lettinga. Bioresource Technology 97: 1105 – 1118. (2006)

http://www.researchgate.net/profile/Grietje_Zeeman/publication/7226593_The_effects_of_operational_and_environmental_variations_on_anaerobic_wastewater_treatment_systems_a_review/links/0deec52163f8265a36000000?origin=publication_detail (em Inglês)

Applications of two-phase anaerobic degradation in industrial wastewater treatment. S. Ke; Z. Shi. International Journal of Environment and Pollution 23(1): 65 – 80. (2005)

<http://www.environmental-expert.com/Files%5C6471%5Carticles%5C6262%5Cf101119712463852.pdf> (em Inglês)

Biotreatment of industrial effluents. M. Doble; A. Kumar. Elsevier. 336 pp. (2005)

http://books.google.com.br/books?id=4qsNn-DZPScC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (em Inglês)

Geração de energia e a digestão anaeróbica no tratamento de efluentes: estudo-de-caso na indústria de papel. M.D. Berni; S.V. Bajay. Anais do III Encontro de Energia no Meio Rural. (2003)

http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000100003&script=sci_arttext

e

http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2000/1_3.pdf (06 pp.)

Diretrizes de gestão e tecnologia para o tratamento de efluentes industriais. A.L.P. Silva. Dissertação de Mestrado. UFPE – Universidade Federal de Pernambuco. 92 pp. (2003)

http://repositorio.ufpe.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/5793/arquivo6622_1.pdf?sequence=1

Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. T.Z.D. Mês; A.J.M. Stams; J.H. Reith; G. Zeeman. Dutch Biological Hydrogen Foundation. 45 pp. (2003)

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/MES%202003%20Chapter%204.%20Methane%20production%20by%20anaerobic%20digestion%20of%20wastewater%20and%20solid%20wastes.pdf (em Inglês)

e

<http://es.ircwash.org/sites/default/files/Reith-2003-Bio.pdf#page=59> (em Inglês)

The value of anaerobic purification for pulp and paper mill effluents. L. Habets; M. Zumbrägel; M. Tielbaard. 2002 TAPPI Environmental Conference. 08 pp. (2002)

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:5rJggPHEYZIJ:www.environmental-expert.com/Files%25C587%25Carticles%25C3040%25Cpaques25.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br> (em Inglês)

Sustentabilidade ambiental e geração de energia na indústria de papel com o uso de reator anaeróbico no tratamento de efluentes. M.D. Berni; S.V. Bajay. 34º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 10 pp. (2001)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/2001_Reator_anaerobio_tratamento_efluents.pdf

e

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/2001_Uso_reator_anaerobi_tratamento_efluentes.pdf

New perspectives in anaerobic digestion. J.B. van Lier; A. Tilche; B.K. Ahring; H. Acarie; R. Moletta; M. Dohanyos; L.W.H. Pol; P. Lens; W. Verstraete. Water Science and Technology 43(1): 01 – 18. (2001)

http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_57-58/010024947.pdf (em Inglês)

Anaerobic treatment of evaporator condensates from the chemical pulp industry. W. Driessen; M. Tielbaard; L. Habets; P. Yspeert. VI Latin American IWA Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion. 05 pp. (2000)

http://lms.i-know.com/pluginfile.php/28591/mod_resource/content/2/ANAEROBIC%20TREATMENT%20OF%20EVAPORATOR%20CONDENSATES.pdf (em Inglês)

Zero effluent by application of biological treatment at high temperature. L.H. Habets; A. Deschildre; H. Knelissen; J. Arrieta. TAPPI Environmental Conference. 08 pp. (2000)

<http://www.environmental-expert.com/Files%5C587%5Carticles%5C3037%5CPAPER208.pdf> (em Inglês)

State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. K.V. Rajeshwari; M. Balakrishnan; A. Kansal; K. Lata; V.V.N. Kishore. Renewable and Sustainable Energy Reviews 4: 135 – 156. (2000)

http://www.researchgate.net/publication/222646880_State-of-the-art_of_anaerobic_digestion_technology_for_industrial_wastewater_treatment (em Inglês)

Avaliação do desempenho de um reator anaeróbio de manta de lodo UASB no tratamento de licor negro diluído proveniente de uma indústria de polpa kraft. E.C. Pires; A.P. Buzzini. 32º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 11 pp. (1999)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1999_Avaliacao_Desempenho_Reator_UASB.pdf

Remoção de compostos organoclorados em um reator anaeróbio de manta de lodo UASB. A.P. Buzzini; E.C. Pires. 32º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 11 pp. (1999)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1999_Remocao_Compostos_Organoclorados_Reator_Anaerobio.pdf

Tratamento biológico e físico-químico para reuso dos efluentes do estágio de branqueamento. E.C. Pires; L. Nalim. 32º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 11 pp. (1999)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1999_Reuso_Efluentes_Estagio_Branqueamento.pdf

Biotechnology for environmental protection in the pulp and paper industry. P. Bajpai; P.K. Bajpai; R. Kondo. Springer Berlin Heidelberg. 266 pp. (1999)

<http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-60136-1> (em Inglês)

e

http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-60136-1_7#page-1
(Capítulo "Treatment of wastewaters with anaerobic technology" - p.: 109-139 - em Inglês)

Anaerobic treatment of kraft foul condensates. C. Wiseman; M. Tielbaard; V. Biskovich; T. Wilson; R. Garber. 1998 TAPPI Environmental Conference Proceedings. 08 pp. (1998)

<http://www.tappi.org/Bookstore/Technical-Papers/Conference-Papers/1998/ENV98/Anaerobic-Treatment-of-Kraft-Foul-Condensates-1998-Environmental-Conference-Proceedings.aspx> (em Inglês)

Tratamento anaeróbio aeróbio do efluente do cozimento da obtenção de celulose de palha de arroz pelo processo cal. Parte I - Partida e operação do reator de fluxo ascendente com manta de lodo. W.D. Gerber; M. Gerber; O.L.V. Faria; E. Freire; D. Carvalho. 31º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 12 pp. (1998)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1998_Tratamento_anaerobico_aerobico_efluente.pdf

ABSTRACT: Sequential anaerobic and aerobic treatment of kraft pulping wastes. R. Qiu; J.F. Fergusom; M.M. Benjamin. Water Science & Technology 20(1): 107 - 120. (1998)

<http://www.iwaponline.com/wst/02001/wst020010107.htm> (em Inglês)

Compostos organoclorados em efluentes da indústria de papel e celulose degradam anaerobiamente? L.G. Guaglianoni; E.C.

Pires. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 13 pp. (1997)

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/celulosa.pdf>

A aplicação do tratamento anaeróbio em efluentes da indústria de papel e celulose. L.G. Guaglianoni; E.C. Pires; M.A. Nolasco. O Papel (Setembro): 54 - 59. (1995)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1995_Tratamento_anaerobio_em_efluentes.pdf

Tratamento de efluentes industriais. V.M. Grieco. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 142 pp. (1995)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1995_Tratamento_Efluentes_Liquidos_Industriais.pdf

Degradação anaeróbica de lodo do tratamento de efluentes de fábrica de celulose. E. Ratnieks; C. Gaylarde. 28º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 16 pp. (1995)

http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/12_degrada%27%2E3o_anaer%2F3bica_do_lodo_Edvin_s.pdf

Anaerobic treatment in pulp- and paper-mill waste management: A review. J.A. Rintala; J.A. Puhakka. Bioresource Technology 47: 01 – 18. (1994)

http://www.researchgate.net/publication/223022145_Anaerobic_treatment_in_pulp_-_and_paper-mill_waste_management_A_review (em Inglês)

TAPPI/ATCP Wastewater treatment seminar. D.E. Peakes; S.C. White. TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry; ATCP – Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y del Papel. (1992)

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xAwEjqmsQxgJ:https://getinfo.de/app/1992-ATCP-TAPPI-wastewater-treatment-seminar-Torremar/id/TIBKAT%253A157220575+&cd=7&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br> (em Inglês)

International Symposium on “Pollution prevention in the manufacture of pulp and paper – Opportunities and barriers”.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. 343 pp. (1993)

<http://nepis.epa.gov/EPA/html/DLwait.htm?url=/Exe/ZyPDF.cgi/91013V3C.PDF?Dockey=91013V3C.PDF> (em Inglês)

Tratabilidade biológica de efluente da indústria de celulose e papel. O. Vieira. 23º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 18 pp. (1990)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1990_Tratabilidade_biologica_de_efluente.pdf

A utilização de reator anaeróbio de manta de lodo para o tratamento de despejos da indústria de papel. C.A.S. Rameh. 20º Congresso Anual. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 14 pp. (1987)

http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/ABTCP/1987_lodos_anaerobicos_reatores.pdf

e

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/1987_A_utilizacao_de_reator_anaerobio.pdf

Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. M.E. Souza. Revista DAE 44(137): 88-94. (1984)

http://www.revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_137_n_1173.pdf

Anaerobic waste treatment fundamentals. Part One, Part Two, Part Three and Part Four. P.L. McCarty. Public Works. 19 pp. (1964)

<http://www.seas.ucla.edu/stenstro/Anaerobic%20assignment.pdf> (em Inglês)

Application of anaerobic biological treatment for sulfate removal in viscose industry wastewater. V. Parravicini; K. Svardal; H. Kroiss. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 08 pp. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_%20Application_anaerobic_biological_treatment.pdf

e

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Application_of_anaerobic_biological_treatment.pdf

e

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Sulphate_removal_viscoese_industry.pdf

Anaerobic treatment of low strength wastewater. F.Y. Cakir; M.K. Stentrom. Department of Civil and Environmental Engineering. p: 20 – 66. (SD = Sem referência de data)

<http://www.seas.ucla.edu/stenstro/Anaerobic%20assignment.pdf> (em Inglês)

Avaliação do tratamento de efluentes de indústrias de papel e celulose em condições aeróbias e anaeróbia. A.P. Buzzini; M.A. Nolasco; A.M. Springer; E.C. Pires. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 06 pp. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Avaliacao_tratamento_efluentes.pdf

e

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Tratamento_efluentes_condicoes_aerobias_anaerobia.pdf

Anaerobic treatment in progress for better environment and lower cost in the pulp and paper industry. L. Habets; R. Yamanaka. PAQUES. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Apresentação em PowerPoint: 36 slides. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_%20Application_anaerobic_biological_treatment.pdf (em Inglês)

Application of biological treatment for zero effluent at packaging paper mills. L.H.A. Habets. PAQUES. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 09 pp. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Application_biological_treatment_zero_effluent.pdf (em Inglês)

Reutilização de água e gerenciamento dos efluentes líquidos de fábricas de papéis recicláveis. C.M. Silva. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Apresentação em PowerPoint: 71 slides. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Reutilizacao_Agua_Gerenciamento_Efluentes.pdf

Tratamento de efluentes e geração de créditos de carbono. D.R. Medeiros. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Apresentação em PowerPoint: 33 slides. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Geracao_creditos_de_carbono.pdf

Tratabilidade de efluentes de branqueamento de celulose baseada na caracterização detalhada. M.C.S. Amaral; L.H. Andrade; L.C. Lange. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 10 pp. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Tratabilidade_efluentes_branqueamento.pdf

Tecnologia para sua planta "tissue". Tratamento aeróbio x anaeróbico. S. Romero; L.A. Menke. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Apresentação em PowerPoint: 29 slides. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Tratamento_Aerobio_Anaerobico.pdf

Utilização de sistema combinado de reatores anaeróbico-aeróbico (UASB / Lodo ativado) termofílicos para tratamento de efluente simulado da indústria de celulose. D.F. Carmo; E.C. Pires. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 07 pp. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Tratamento_efluente_simulado.pdf

Inovações no uso de tratamentos biológicos aplicados às águas residuárias da indústria de papel e celulose. E.C. Pires; L.G. Guaglianoni. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 15 pp. (SD = Sem referência de data)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/SD_Tratamentos_Biologicos_Aplicados.pdf

Um sistema de tratamento de efluentes de baixo custo. Acqua Engenharia. 05 pp. (SD = Sem referência de data)

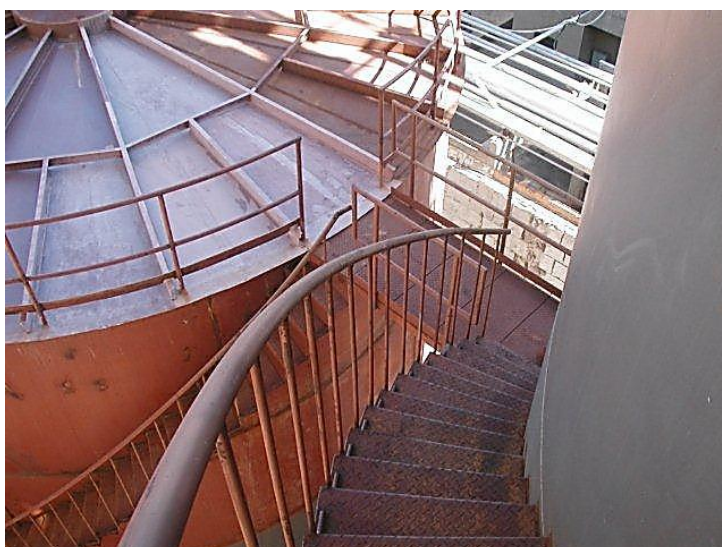
<http://www.acquaeng.com.br/wp-content/uploads/2010/01/stbc.pdf>

Capítulo 5: Tratamento anaeróbico. EEA – Empresa de Engenharia Ambiental. Curso de Tratamento de Esgoto. 41 pp. (SD = Sem referência de data)

http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Curso-Trat-Esgoto_Capitulo-5.pdf

Introduction of the IC reactor in the paper industry. L.H.A. Habets. PAQUES Water Systems. 07 pp. (SD = Sem referência de data)

<http://www.environmental-expert.com/Files%5C587%5Carticles%5C5523%5Cpaques16.pdf> (em Inglês)



Biorreator anaeróbico – Uma rota biotecnológica promissora
Fonte da foto: Alexandro Coelho

Espero que essa coletânea de conhecimentos variados sobre o uso de algumas biotecnologias anaeróbicas práticas e viáveis para fins ambientais possa ter sido de utilidade para vocês.

Um abraço a todos e muito obrigado

