

LODO DE ESGOTO: POTENCIALIDADE, TRATAMENTO E RECUPERAÇÃO DE SUBPRODUTOS

WILZA DA SILVA LOPES

Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB e Pesquisadora do Instituto Nacional do Semiárido, wilzasilvalopes@insa.gov.br;

MATEUS CUNHA MAYER

Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB e Pesquisador do Instituto Nacional do Semiárido, mateus.mayer@insa.gov.br;

RODRIGO DE ANDRADE BARBOSA

Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB e Pesquisador do Instituto Nacional do Semiárido, rodrigo.barbosa@insa.gov.br.

RESUMO

O lodo de esgoto é uma mistura complexa resultante do processo de tratamento. No entanto, por apresentar microrganismos patogênicos e grande teor de água e matéria orgânica, necessita de tratamento antes de sua disposição final. Ainda é bastante empregado técnicas de tratamento que reduzem o teor de água, orgânico e patogênico com disposição em aterro sanitário, o que não se apresenta como uma técnica eficaz do ponto de vista econômico e ambiental. Dessa forma, o objetivo do estudo foi levantar as potencialidade do lodo de esgoto, bem como técnicas que associem ao tratamento o aproveitamento de energia e nutrientes. Dentre as principais tecnologias, a digestão anaeróbia ainda é viável pelo sua simplicidade, custo e potencialidade de produção de biogás. Sendo as técnicas de solubilização e/ou e de membranas processos que aumentam o desempenho da digestão em níveis de produção energética e de tratamento do lodo. Além das citadas, os tratamentos térmicos apresentam grande potencial do ponto de vista de recuperação de energia e de nutriente, com potencial para produção de energia e uso na agricultura. Para esses processos são necessárias maiores investigações para otimizar e viabilizar a sua aplicação, mesmo com o custo elevado.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia, Tratamento térmico, Nutrientes, Biogás, Membrana.

LODO DE ESGOTO E SUAS CARACTERÍSTICAS

Considerações gerais

O lodo de esgoto pode ser conceituado como os resíduos resultantes dos sistemas de tratamento de esgoto, e corresponde a uma fonte potencial de risco à saúde pública devido à presença de compostos orgânicos persistentes e organismos patogênicos.

Segundo van Haandel e Alem Sobrinho (2006), o lodo é o termo utilizado para os sólidos gerados nos processos de tratamento. Esse lodo pode ser gerado na etapa de tratamento primário, o lodo primário; e no tratamento biológico é produzido o lodo secundário.

O lodo primário é resultante do processo de sedimentação dos sólidos. Nesse processo aproximadamente 1/3 da DBO₅ é removida do efluente. Já o lodo secundário é constituído por grande parte de microrganismos vivos. Esse lodo são gerados nos processos biológicos de tratamento secundário (anaeróbio e/ou aeróbio). A eficiência de remoção está relacionada a alguns fatores (tipo de tratamento, parâmetros operacionais, dentre outros), bem como à biomassa ativa do sistema, uma vez que a massa de microrganismo digere a matéria orgânica em seus processos metabólicos.

O lodo geralmente apresenta-se na forma semissólida, contendo de 0,25 a 12% de ST, e denotam uma mistura complexa e heterogênea de microrganismos, materiais orgânicos e inorgânicos. Nos lodos secundários, as concentrações de sólidos totais estão condicionadas ao tipo de tratamento biológico aplicado (FERREIRA e ANDREOLI, 1999; KUGLARZ *et al.*, 2013).

Alguns dos constituintes do lodo são importantes para escolha do tratamento e disposição final. O poder energético do lodo é uma propriedade importante, bem como a presença de nutrientes proporcionam usos benéficos. Na Tabela 1 são apresentadas algumas características para o lodo primário e lodo secundário.

Tabela 1. Composição química do lodo primário e secundário não tratado.

Parâmetro	Lodo primário	Lodo ativado
Sólidos Totais (% de ST)	1– 6	0,4– 1,2
Sólidos Voláteis (% de ST)	60– 85	60– 85
Óleos e graxas (% de ST)	5– 8	5–12
Proteínas (% de ST)	20– 30	32– 41

Parâmetro	Lodo primário	Lodo ativado
Nitrogênio (N, % de ST)	1,5-4	2,4-5
Fósforo (P2O5, % de ST)	0,8- 2,8	2,8 - 11
Potássio (K2O, % de ST)	0- 1	0,5- 0,7
Celulose (% de ST)	8-15	-
Sílica, (SiO2, % de ST)	15- 20	-
pH	5- 8	6,5-8
Alcalinidade (mg CaCO3/L)	500 - 1.500	580 - 1.100
Ácidos graxos voláteis (mg HÁc/L)	200 - 2.000	1.100- 1.700
Energia contida (kJ/kg SSV)	23.000-29.000	19.000- 23.000

Fonte: Metcalf & Eddy, (2003).

Essa diversidade de componentes do lodo pode variar em função da origem do esgoto e do tratamento; e devido ao seu potencial de contaminação, faz-se necessário um procedimento e uma disposição adequada para minimização dos impactos negativos ao meio ambiente.

Microrganismos patogênicos

Os microrganismos encontrados no esgoto incluem bactérias, fungos, protozoários, helmintos, vírus, dentre outros. Os microrganismos patogênicos são aqueles que quando em contato com os seres humanos são capazes de causar doenças, seja por ingestão, inalação ou contato dérmico. O lodo apresenta inúmeros microrganismos patogênicos e a sua presença é advinda do esgoto, ocorridas por meio de sedimentação (ANDREOLI *et al.*, 2001; METCALF & EDDY, 2016).

Os organismos patogênicos encontrados no esgoto podem ser classificados em quatro categorias: vírus, bactérias, protozoários e helmintos. Na Tabela 2 são apresentados alguns dos principais microrganismos patogênicos encontrados no esgoto e, conseqüentemente, no lodo.

Tabela 2. Principais microrganismos patogênicos encontrados no esgoto doméstico.

Bactérias	Protozoários	Helmintos	Vírus
<i>Campylobacter jejuni</i>	<i>Balantidium coli</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i>	<i>Adenovírus</i>
<i>Clostridium</i>	<i>Criptosporidium</i>	<i>Enterobius vermicularis</i>	<i>Enteroviruses</i>
<i>Escherichia coli</i>	<i>Cyclospora</i>	<i>Faciola hepatica</i>	<i>Hepatitis A vírus</i>
<i>Leptospira</i>	<i>Entamoeba histolytica</i>	<i>Hymenolepis nana</i>	<i>Norovirus</i>

Bactérias	Protozoários	Helmintos	Vírus
<i>Mycobacterium</i>	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Taenia</i>	<i>Pavovirus</i>
<i>Pseudomonas</i>		<i>T. solim</i>	<i>Rotavirus</i>
<i>Salmonella</i>		<i>Trichiuris trichiura</i>	
<i>Shigella</i>			
<i>Vibrio</i>			
<i>Yersinia</i>			

Fonte: Adaptado, METCALF & EDDY, (2016).

Alguns desses microrganismos fazem parte do próprio sistema digestivo do homem. Esses microrganismos são excretados com as fezes de pessoas doentes, como por exemplo, a *Salmonella*, *Vibrio Cholerae*, *Esherichia coli*, *Salmonella spp*, *Enteropatogênicos*. Ainda pode ocorrer pela presença de alguns animais na rede coletora, principalmente roedores.

Como a exposição a esses microrganismos pode causar diversas doenças, seja por contato direto ou indireto, é necessário que o lodo seja direcionado a um tratamento; de modo que esses microrganismos sejam minimizados, para proteção da saúde e do meio ambiente, como o solo e a água.

Uma das bactérias mais comuns encontradas no esgoto é a do grupo coliforme, sendo as coliformes fecais (termotolerantes) aquelas encontradas nos intestinos e nas fezes de humanos e animais de sangue quente. Essas são utilizadas como indicador de contaminação, sendo a *E. coli* a espécie predominante no grupo dos coliformes fecais.

Diferentes ovos de helmintos são encontrados no esgoto. Esses apresentam variação de tamanho, com dimensões de aproximadamente de 10µm a 100µm. Os ovos podem ser removidos por processos de sedimentação e de filtração. São microrganismos bastante resistentes, podendo sobreviver aos procedimentos usuais de desinfecção. Processos de desinfecção podem alterar a viabilidade dos helmintos, passando a ser não viáveis (VON SPERLING, 1996; METCALF & EDDY, 2003).

Mediante a sua capacidade de sobrevivência e a sua origem patogênica, os ovos de helmintos e os coliformes termotolerantes tornam-se indicadores importantes para avaliar as condições sanitárias do lodo, necessitando de medidas que minimizem e/ou inativem as concentrações desses microrganismos, promovendo a reutilização desse resíduo ou assegurando a disposição final sem causar impactos negativos no meio.

Nutrientes

Os nutrientes são elementos químicos essenciais para a vida, sendo divididos em macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio) e micronutrientes (zinco, cobre, ferro, molibdênio, manganês, etc.). Os macronutrientes são necessários em grandes quantidades e têm função estrutural, e os micronutrientes são requeridos em menores quantidades e têm função reguladora.

De acordo com Bettiol e Camargo (2006), lodo de esgoto típico apresenta em torno de 40% da matéria orgânica, 4% de nitrogênio (NTK), 2% de fósforo total, outros macronutrientes, micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos. Entretanto, o lodo de esgoto tem utilidade agrícola, isso porque a presença de nitrogênio, fósforo e potássio faz com que o mesmo tenha um bom potencial de fertilização, tendo como principal benefício a incorporação de nutrientes. Contudo, além do conhecimento sobre a composição química do lodo, é necessário saber sobre a dinâmica dos nutrientes após a aplicação no solo, de forma a obter benefício e evitar impactos negativos ao meio ambiente.

A quantidade de nitrogênio no esgoto se dá pelos processos de amonificação e de nitrificação da fração líquida, os quais ocorrem pela ação das bactérias e, portanto, influenciados pelo pH, temperatura, umidade e outras condições ambientais (BOEIRA e MAXIMILIANO, 2006).

Mediante as quantidades de nitrogênio e de fósforo no lodo de esgoto, esse resíduo pode substituir os fertilizantes minerais, atuando como fonte de nutrientes para as plantas. No entanto, a concentração de potássio é bem pequena, cerca de 1%. Isso ocorre porque o potássio (K) é solúvel em água e assim, permanece na fase líquida do esgoto tratado (MUNHOZ e BERTON, 2006; TSUTIYA, 2002).

Portanto, apesar de apresentar boas concentrações dos principais macronutrientes, em especial o nitrogênio, alguns cuidados são necessários para sua utilização, uma vez que o excesso de nutrientes pode provocar toxicidade e prejudicar o desenvolvimento das plantas, além de poluir as águas.

Substâncias Poliméricas Extracelulares – EPS

EPS, termo utilizado para as substâncias poliméricas extracelulares, representa diferentes classes de macromoléculas sintetizadas pelos microrganismos,

como polissacarídeos, proteínas, lipídios, ácidos nucleicos e outros compostos poliméricos presentes no interior da célula.

De maneira geral, existem dois tipos de EPS: os que estão firmemente ligados às células (bainhas, polímeros capsulares, géis condensado); e os EPS solúveis, que estão fracamente ligados às células ou estão dissolvidos. Contudo, é o material firmemente ligado o de maior interesse nas pesquisas (SHENG *et al.*, 2010).

EPS possuem como principais componentes carboidratos e proteínas, além das substâncias húmicas. No lodo, a composição é de aproximadamente 40% de proteínas, 7% de carboidratos, 0,4% de lipídios e 52,6% de componentes desconhecidos, percentual por massa de sólidos suspensos em base úmida (FENG *et al.*, 2009; SHENG *et al.*, 2010).

Essas substâncias presentes no interior das células influenciam nas propriedades físico-químicas dos agregados microbianos, na atividade metabólica, na estrutura do floco do lodo, na sedimentação e no desaguamento. Todavia, o conhecimento sobre as EPS se faz necessário para o processo de tratamento do lodo.

Segundo Hogendoorn *et al.* (2013), EPS funcionam como uma barreira protetora contra influências bióticas e abióticas do meio ambiente, proporcionando aos microrganismos a oportunidade para formar um agregado estável à ação de diferentes células. Para Park *et al.* (2007), as EPS são responsáveis pela formação de colônias microbianas, sendo peça de fundamental importância para a biofloculação. Além do que, promove a proteção das células contra condições ambientais adversas, como turbulência e desidratação, além de servir como fonte de carbono e energia.

Nesse contexto, percebe-se que as EPS são importantes para todo o processo de tratamento; e sendo assim, diversos estudos vêm surgindo visando à extração e à quantificação desse material, tanto para o aproveitamento energético, como também para o tratamento e a estabilização do lodo de esgoto.

Os métodos de extração podem ser físicos, químicos ou uma combinação destes. Os físicos utilizam forças externas criadas, que separam as células de EPS e as dissolvem no meio; como, por exemplo, aquecimento, centrifugação a alta velocidade, sonicação. Já os métodos químicos têm melhor eficiência de extração que os métodos físicos e envolvem a adição de um composto que permite o rompimento das ligações entre as EPS, tais como tratamento alcalino, tratamento ácido, extração etanol, extração enzimática, NH₄OH/EDTA, dentre outras (SHENG *et al.*, 2010).

2. TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO

O tratamento do lodo de esgoto, de modo geral, visa à redução do volume e a estabilização da matéria orgânica. Porém, conforme já descrito no item anterior, o lodo de esgoto apresenta constituintes importantes que podem ser reutilizados, tais como os nutrientes e as EPS; bem como constituintes que dificultam a sua utilização e causam impactos negativos quando lançados ao meio ambiente sem tratamento adequado. Os métodos de tratamento de lodo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Métodos para tratamento do lodo.

	Objetivo	Tipos	Observações
Adensamento	Reduzir a quantidade de água presente no lodo por meios físicos.	Adensamento por gravidade, flotação, ar dissolvido, centrifugação, adensador de esteira, tambor rotativo.	Proporciona benefícios como redução do volume do tanque de armazenamento e equipamento de processamento.
Condicionamento	Processo para melhorar a separação das fases sólido- líquido do lodo. O condicionamento químico resulta na floculação (agregação) das partículas.	Utilizam compostos inorgânicos (cal, cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato de alumínio) e/ ou polímeros (sais de ferro).	Fatores que afetam o condicionamento do lodo. Físicos: distribuição e tamanho das partículas e grau de mistura. Químicos: pH e alcalinidade, concentração de sólidos, carga superficial, natureza e associação água-sólido.
Desaguamento	Consiste na separação do material sólido/ líquido presente no lodo.	Secagem natural (leitos de secagem e lagoas de secagem) ou métodos mecânicos (filtro prensa, prensa desaguadora e rotativa, centrífugas).	Reduz custos de transporte. É utilizado antes da incineração, compostagem, secagem térmica.
Secagem térmica	Reduzir o teor de umidade do lodo através da aplicação de calor para evaporação da água.	Secadores diretos, secadores indiretos, secadores direto/ indireto, secadores infravermelho.	Baseia-se no método predominantemente de transferência de calor. O calor pode ser transferido por convecção, condução, radiação ou combinação de dois ou mais métodos.

	Objetivo	Tipos	Observações
Estabilização Biológica	Minimizar os microrganismos patogênicos e reduzir, eliminar ou inibir o potencial de putrefação do lodo e produção de odores.	Compostagem, estabilização alcalina, digestão aeróbia, digestão anaeróbia.	Para atingir a estabilização é necessário reduzir os sólidos voláteis, oxidar a matéria orgânica.

Fonte: Adaptado, FERNANDES e SOUZA (2001); MIKI *et al.*, (2006); METCALF & EDDY, (2016).

A utilização de tecnologias sustentáveis visando o tratamento das águas residuárias e do seu subproduto, o lodo de esgoto, tem se tornado cada vez mais foco de interesse para um processo de gestão sustentável dos recursos ambientais e para proteção do meio ambiente. Isso porque o lodo de esgoto, apesar de gerar grandes impactos negativos ao meio quando disposto de forma inadequada, é um resíduo valioso por apresentar potencial energético e nutriente.

Os compostos de fósforo podem ser removidos das águas residuárias por processos biológicos e/ou químicos. Em alguns processos de tratamento biológico, cerca de 90% do fósforo e do nitrogênio presentes nos esgotos são transferidos para o lodo. Com o crescimento da biomassa, 30-40% do fósforo já é eliminado por absorção biológica. Já o processo químico se dá pela adição de um composto que permita a precipitação, não dependendo assim de microrganismos (BI *et al*, 2014; EGGLE *et al*, 2015).

Portanto, a utilização de técnicas que visam o tratamento e à recuperação dos nutrientes do lodo de esgoto é importante do ponto de vista ambiental e, também, econômico. Segundo Egle *et al.* (2015), os processos de recuperação de nutrientes começam pelo tratamento do lodo, sendo exemplo: tratamento anaeróbio, hidrólise térmica e/ou química, oxidação ou lixiviação química, isso ocorre para que o fósforo se dissolva no meio líquido.

3. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO PARA RECUPERAÇÃO DE SUBPRODUTOS

Digestão anaeróbia e reatores de membranas

A digestão anaeróbia, é conhecida como uma das técnicas mais antiga e mais importantes para estabilização do lodo biológico secundário. Nela ocorre a decomposição biológica da matéria orgânica ocorre na ausência de oxigênio

dissolvido livre. Por ação dos microrganismos, a matéria orgânica é metabolizada e transformada em CO₂ e CH₄. (METCALF & EDDY, 2016).

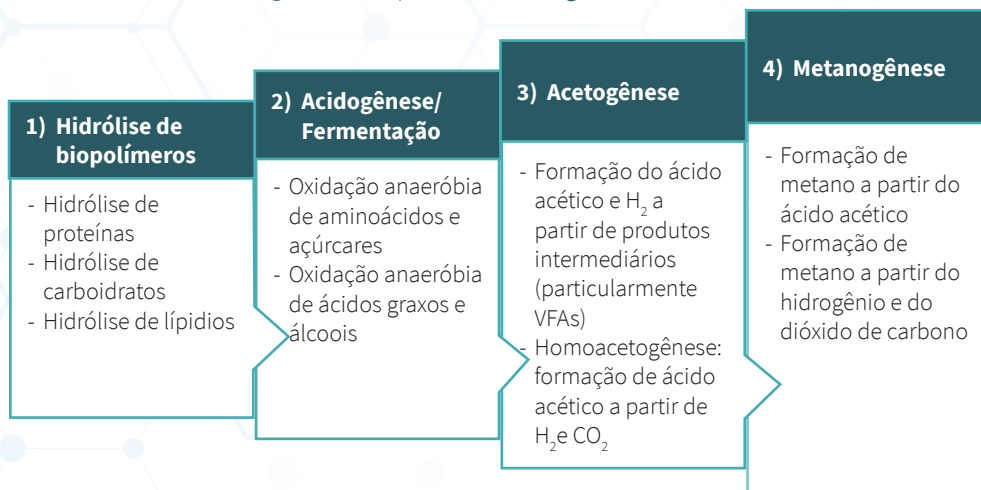
Na biodegradação anaeróbia os microrganismos utilizam outros constituintes, como nitrato e sulfato para metabolizar o material orgânico. Esse tratamento é muito eficaz na remoção de compostos orgânicos biodegradáveis, restando compostos mineralizados, como NH₄⁺, PO₄³⁻, S₂⁻, em solução, sendo do ponto de vista biológico realizado em quatro fases sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994; VAN LIER *et al.*, 2008).

As bactérias hidrolíticas convertem os biopolímeros, tais como proteínas, carboidratos e lipídios, em monômeros orgânicos que podem ser usados como substrato por organismos fermentativos (aminoácidos e açúcares) ou por oxidantes anaeróbios (ácidos graxos). Os compostos gerados são absorvidos na membrana celular das bactérias fermentativas e após metabolizados são excretados como compostos solubilizados precursores do acetato tais como, álcool, ácidos graxos de cadeia curta (propionato, butirato, etc), compostos minerais como CO₂, H₂, dentre outros. (GURJE e ZEHNDER, 1983; FORESTI *et al.*, 1999; VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006).

A acetogênese converte os produtos resultantes da acidogênese, a substâncias ainda mais digeridas, produzindo principalmente ácido acético, além de CO₂ e hidrogênio (H₂). Esta conversão é controlada em sua maior parte pela pressão parcial do H₂ na mistura

Na fase metanogênica a formação do metano se dá por meio de dois mecanismos: as metanogênicas acetoclásticas utilizam o acetato para produzir o CO₂ e CH₄, através da clivagem do ácido acético na ausência de hidrogênio; e, o segundo grupo, metanogênicas hidrogenotróficas, que utilizam o H₂ como doador de elétrons, reduzindo o gás carbônico (aceptor) para produzir CH₄ (GURJE e ZEHNDER, 1983; APELLS *et al.*, 2008).

De maneira geral, o processo global de digestão anaeróbia realizado por um consórcio microbiano, na qual envolve a conversão conjunta do material orgânico complexo, mineralizando-o em metano, dióxido de carbono, amônia, sulfeto de hidrogênio e água é mostrado na Figura 1.

Figura 1. Subprocessos da digestão anaeróbia

Fonte: Van Lier *et al.* (2008).

A digestão anaeróbia combinada com a separação por membrana vem a ser uma tecnologia promissora, pois comparada ao sistema convencional anaeróbio, permite que a digestão seja operada com maior tempo de retenção a partir da retenção total de biomassa, um efluente com melhor qualidade, além de um menor tempo de partida de sólidos (LIN *et al.*, 2013).

De acordo com Skouteris *et al.* (2012) o primeiro Biorreator Anaeróbio de Membrana (AnMBR) comercial foi construído no início dos anos 80, por Dorr-Oliver para o tratamento de águas residuais; um desenvolvimento conhecido como sistema de reator anaeróbico de membrana. Desde então, os AnMBRs foram estudados para o tratamento de águas residuais municipais e industriais de todas as diferentes cargas de contaminantes.

Essa tecnologia apresenta grande potencial e alta velocidade para o tratamento de resíduos orgânicos e águas residuárias. Os AnMBRs é a combinação de duas técnicas de tratamento: a digestão anaeróbia e a filtração por membrana (DHAR *et al.*, 2013; SMITH *et al.*, 2013). Nos AnMBRs ocorre a retenção de biomassa no processo de filtração, permite a operação em elevados tempos de retenção de sólidos, com um potencial para gerar um efluente de alta qualidade (permeado). Para Torres *et al.* (2011), a combinação desses dois sistemas (filtração por membrana e digestão anaeróbia) garantem a manutenção de microrganismos responsáveis pela degradação do material orgânico, proporciona uma barreira física para os poluentes suspensos contidos nas águas residuárias.

No entanto, os AnMBRs apresentam como desvantagem os custos elevados das membranas convencionais. Além disso, nesses sistemas há a formação de incrustações nas membranas (*fouling*), que causa aumento de resistência à filtração e redução do fluxo de permeado, sendo requerida uma limpeza mais frequente, que resulta na redução da vida útil da membrana.

Nesse contexto, surgem os Biorreatores Anaeróbio de Membranas Dinâmicas (AnDMBRs), que consiste no mesmo princípio dos AnMBRs, utilizando apenas as membranas dinâmicas ao invés de membranas de microfiltração e ultrafiltração.

A membrana dinâmica é formada pela deposição de material em suspensão contido no afluente a ser tratado, ou seja, o material vai se depositando sob a membrana suporte, que consiste num material barato, como tecido, malha, etc. Sendo assim, a medida que vai ocorrendo a filtração, a membrana dinâmica vai sendo formada, e a porosidade vai diminuindo, e conseqüentemente a eficiência de remoção vai aumentando. A camada de torta formada (membrana dinâmica) funciona como um filtro adicional, dado que a deposição da camada atuará como uma membrana “secundária” antes da membrana “real” ou membrana suporte. Como a retenção efetiva do material é mais dependente da membrana dinâmica do que da membrana suporte, pode-se então fazer uso de material suporte barato ao invés de membranas de microfiltração e ultrafiltração usadas em AnMBR (ZHANG *et al.*, 2010; HU *et al.*, 2018).

Os AnDMBRs é uma tecnologia bastante favorável, uma vez que resulta em um efluente de boa qualidade, com remoções de 99% de turbidez e sólidos suspenso, e eficiências acima de 90% para DQO (ERSAHIN *et al.*, 2014; GUAN *et al.*, 2018).

Tratamento térmico

O tratamento térmico de resíduos é o processo na qual utiliza o calor como forma de recuperar, separar ou neutralizar determinadas substâncias presentes nos resíduos, ou reduzir massa e volume, ou produzir energia térmica, elétrica ou mecânica. Atualmente, as principais tecnologias de tratamento térmico de resíduos, com aproveitamento energético, são a incineração/combustão, a pirólise e a gaseificação (ROSA *et al.*, 2015).

A incineração é um processo de combustão controlada que emprega altas temperaturas (acima de 800°C), que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo (como carbono, hidrogênio e enxofre), convertendo sua energia química em calor. Por sua vez, a pirólise é um processo de decomposição térmica, na ausência de oxigênio, por

fonte externa de calor, que converte a matéria orgânica em diversos subprodutos. Já a gaseificação é um processo termoquímico de decomposição de material sólido ou líquido (que tenha carbono em sua composição) em um produto gasoso combustível (gás de Síntese), para a produção de syngas cujos principais componentes são monóxido de carbono e hidrogênio, contendo também dióxido de carbono e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2012). As principais vantagens e desvantagens desses sistemas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Principais vantagens e desvantagens dos processos de tratamento térmico.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Pirólise	Processo não demanda queima; Processo flexível e versátil; Produção de elevada quantidade de óleo, que pode ser utilizada em vários processos químicos ou cogeração; Redução de volume do lodo da ordem de 90% e geração de material inerte; Exclusão da formação de subprodutos tóxicos (dioxinas), em virtude da operação em baixas temperaturas e atmosfera redutora; Formação dos produtos finais (gás, carvão e óleo), os quais apresentam potencial de serem aproveitados na forma de combustível; Elevada taxa de conversão dos subprodutos à energia; Moderado poder calorífico dos gases gerados na pirólise, da ordem de 15 MJ/m ³	Elevado custo operacional e de manutenção; Elevado custo de tratamento dos efluentes gasosos e líquidos; Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com potencial concentração dos metais pesados originalmente presentes no substrato; Demanda prévia de desidratação e secagem do lodo; Baixa maturidade tecnológica; Menor liberação de energia no próprio processo; poder calorífico continua significativo nos subprodutos.
Gaseificação	Produção de energia e redução do volume de resíduos produzidos; Produção de gás após a gaseificação do lodo com moderada a boa qualidade e inflamabilidade, o qual pode dar suporte a processos de secagem do próprio lodo; Potencial de geração de energia elétrica a partir do gás em benefício da ETE; Elevado rendimento na conversão à eletricidade; Reduzida emissão de poluentes; Produção de resíduo sólido inerte.	Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com elevada constituição de metais pesados; Demanda prévia de desidratação e secagem do lodo; Tecnologia complexa e pouco disponível comercialmente; O alcatrão formado durante o processo de gaseificação, se não completamente queimado, pode limitar as aplicações do syngas.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Combustão	A cocombustão de lodo e combustível convencional possui menor investimento. Recuperação de energia (elétrica e/ou vapor d'água), permitindo a redução de custos operacionais. Dispensável, em muitos casos, a secagem do lodo, havendo somente a necessidade da etapa de desidratação do material. Elevada redução do volume do lodo, em torno de 90%. Remoção de praticamente todos os componentes orgânicos. Possibilidade de utilização das cinzas resultantes do processo. Alta taxa de liberação do poder calorífico e potencial de aproveitamento energético.	Custo elevado de implantação e operação; Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com elevada constituição de metais pesados; Potencial de geração de compostos como NOx, SOx, HCl, HF, assim como de metais pesados, dioxinas e furanos; A combustão direta do lodo pode caracterizar incineração; Demanda prévia de desidratação do lodo; Elevados custos para o controle ambiental, devido à limpeza dos gases.

Fonte: Rosa *et al.* (2015)

4. RECUPERAÇÃO DE ENERGIA E DE NUTRIENTES DO LODO DE ESGOTO

A digestão anaeróbia é um dos mais importantes processos para o tratamento do lodo biológico, isso por apresentar como vantagem a redução do volume do lodo, recuperação de energia na forma de metano e a estabilização do lodo, uma vez que realiza a decomposição da matéria orgânica. Os longos tempos de retenção de sólidos (TRS) no processo de digestão anaeróbia convencional de lodo (de 20 a 30 dias) favorecem os microrganismos de baixo crescimento e, conseqüentemente, proporciona um melhor desempenho na produção de metano. (Strong *et al.* 2011; METCALF & EDDY, 2016; XU *et al.*, 2014).

Atualmente as pesquisas tem buscado técnicas para aprimorar e, assim, melhorar a produção de biogás na digestão anaeróbia. Lopes *et al.* (2019) analisaram a produção de biogás em lodo primário e lodo pré-tratado, a TRS de 8 dias, e como resultando encontraram uma produção de biogás 13% maior para o lodo pré tratado. Outro ponto observado pelos autores é que esse processo combinado a uma solubilização alcalina levaria a um melhor desempenho nas fases subseqüentes da digestão anaeróbia e, conseqüentemente, maior eficiência na produção de biogás. Sousa *et al.* (2021) investigaram a solubilização de lodo de excesso de sistemas de lodos ativados e observaram que o

pré-tratamento alcalino aumentou a potencialidade de biogás pelo teste de biometanização.

Como já citado, a associação de membranas à digestão anaeróbia vem sendo bastante difundida, o que tem resultado numa maior retenção dos microrganismos anaeróbios, ou seja, o tempo de retenção de sólidos (TRS) utilizado em AnMBRs e AnDMBRs é alto (50-700 dias) (STUCKEY, 2012; OZGUN *et al.*, 2013).

Esse aumento no TRS tem favorecido tanto na melhoria da qualidade do efluente gerado nesse sistema, como na produção de biogás. Alibardi *et al.* (2016), utilizando AnDMBR, obtiveram remoção média de 80% da DQO total e 90% de DQO solúvel; após dois meses de operação houve um aumento contínuo da taxa de produção de biogás em cerca de 70%. O rendimento de metano em sistemas AnDMBR situa-se em torno de 0,3 LNCH₄/gDQO removida (ERSAHIN *et al.*, 2014; XIE *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2018).

Meabe *et al.* (2013) compararam a utilização de AnMBR para o tratamento de lodo de esgoto em condições mesofílicas (35°C) e termofílicas (55°C). Foi observado, sob condições termofílicas com maior fluxo, menor viscosidade, maior TRS e melhor desempenho de filtração; a produção de metano foi semelhante em ambas as temperaturas, resultando na mesma biodegradabilidade de 72% do lodo.

Kooijman *et al.* (2017) investigaram os efeitos da adição de auxiliar de floculação a um biorreator de membrana dinâmica anaeróbia (AnDMBR), para o tratamento de lodo de excesso em sistemas de lodos ativados; os resultados mostraram que, com a adição do floculante, os consórcios metanogênicos não foram afetados, mesmo com uma baixa na viscosidade, não resultando em aumento da produção de biogás.

Gienau *et al.* (2018) avaliaram o processo de tratamento de lodo em membranas cerâmicas e a viabilidade econômica do processo por meio da otimização energética. Foi obtido fertilizante sólido com N/P orgânico de alto valor para aplicações, além de fertilizante líquido por meio de um permeado da osmose reversa, rico em sais nutrientes dissolvidos, com N/K diretamente disponível. Além disso, os autores mostraram, a partir do estudo, reduções de energia de 50% para a unidade de ultrafiltração. Isso pode ser realizado ajustando a temperatura do processo e as condições de fluxo nos módulos da membrana tubular.

Nos processos térmicos de tratamento, a carbonização é a mais consolidada e difundida, uma vez que apresenta maior simplicidade, menor exigência no preparo do lodo e aplicabilidade em ETEs de diferentes portes. Tanto a

gaseificação quanto a pirólise requerem preparo do lodo para o procedimento térmico. No entanto, ambas as tecnologias se apresentam como mais favoráveis para a possibilidade de uso externo dos subprodutos e para o aproveitamento das cinzas como condicionador de solos (ROSA *et al.* 2015).

No entanto, o estudo realizado por Teoh e Li (2019) demonstrou que, além da digestão anaeróbica, a pirólise é um dos métodos de tratamento que apresenta melhor desempenho na redução do volume e peso do lodo, na redução de poluentes, no potencial energético e de uso corretivo do solo, além de apresentar menor potencial de toxicidade e ser ambientalmente adequada com relação a liberação de gases causadores do aquecimento global, isso em comparação com outras tecnologias por eles analisadas.

Gerner *et al.* (2021) investigaram a recuperação de nutrientes vegetais (fósforo e nitrogênio) de lodo de esgoto digerido, para uma produção sustentável de fertilizante por meio do tratamento por carbonização hidrotérmica. Como resultado obtiveram recuperação em torno de 84% e 71% para o fósforo, e 53% e 54% para o nitrogênio na fase líquida. Além disso, mostraram que os metais pesados foram transferidos principalmente para o hidrocarvão e apenas <1 ppm de Cd e 21-43 ppm de Zn foram encontrados na fase líquida dos tratamentos com ácido.

Ahmed *et al.* (2021), utilizando a tecnologia hidrotérmica de carbonização, mostraram que, ao aumentar o tempo de carbonização, a capacidade de desidratação foi melhorada e a concentração de amônia no líquido gerado aumentou. O potencial de biometano para o tempo de carbonização de 1h pode cobrir cerca de 25% das necessidades de energia térmica e elétrica do tratamento por carbonização e da digestão anaeróbia.

Volpe *et al.* (2020), com a carbonização hidrotérmica no tratamento de lodo anaeróbio, demonstraram que o fósforo pode ser efetivamente recuperado via precipitação por lixiviação ácida e subsequente alcalinização, apresentando recuperação superior a 70%. Além disso, os resíduos do hidrocarvão apresentaram teor de elementos inorgânicos e propriedades energéticas compatíveis, sendo possível sua utilização na agricultura e/ou como biocombustível sólido.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O lodo de esgoto, por ser uma mistura complexa e apresentar grande concentração de patógenos, necessita de tratamento adequado antes de sua disposição no meio ambiente. Os tratamentos devem buscar reduzir a fração de água, reduzir o volume e, conseqüentemente, a redução da carga patogênica. No

entanto, por apresentar em sua composição grande fração de material orgânico e de nutrientes, esse resíduo possui grande potencial de recuperação de água, nutrientes e energia, quando aplicada tecnologia adequada de tratamento.

A digestão anaeróbia é uma das técnicas mais empregadas para o tratamento do lodo de esgoto, apresentando simplicidade operacional, baixo custo e recuperação de energia na forma de biogás, sendo sua maior parte constituída por metano. Percebe-se que atualmente os estudos tem buscado otimizar esse processo, para melhorar a degradação do lodo e aumentar a produção de biogás. As técnicas de pré-tratamento se mostram bastante eficazes, uma vez que quebra as estruturas de EPS e tornam o material mais fácil a degradação pela digestão, aumentando assim a produção de biogás.

A associação da digestão anaeróbia a membranas de filtração também demonstra ter bons desempenhos, isso porque é possível uma maior retenção da biomassa dentro do sistema, aumentando seu TRS. Com isso, tem-se a produção de um efluente estável e de alta qualidade, com baixa concentração de material orgânico e em suspensão, lodo de excesso estabilizado e produção de biogás.

A utilização de membranas dinâmicas torna-se bastante promissora para o tratamento de lodo, uma vez que esse material apresenta grande concentração de sólidos, que favorece a formação da membrana dinâmica a partir da filtração. Isso traz uma viabilidade econômica ao processo, pelo baixo custo do material suporte, sem comprometer a produção de biogás.

Por fim, os processos de tratamento térmico possuem maior aplicação por meio da tecnologia de carbonização, a qual apresenta grande potencial para redução do volume de lodo, aproveitamento energético, recuperação de nitrogênio e fósforo de forma disponível, com grande potencial de uso e, ainda, forma um resíduo passível de utilização na agricultura. Vale ressaltar que a aplicação de tecnologias térmicas precisa ser ainda mais explorada, com métodos eficazes para se otimizar os sistemas e aumentar a capacidade de recuperação, de modo a superar as desvantagens existentes e viabilizar o seu uso, mesmo com o elevado custo.

REFERÊNCIAS

AHMED, M.; ANDREOTTOLA, G.; ELAGROUDY, S.; NEGM, M.S.; FIORI, L. Coupling Hydrothermal Carbonization and Anaerobic Digestion for Sewage Digestate

Management: Influence of Hydrothermal Treatment Time on Dewaterability and Bio-Methane Production. **Journal of Environmental. Management**, v 281, 2021.

ALIBARDI, L.; BERNAVA, N.; COSSU, R.; SPAGNI, A. Anaerobic dynamics membrane bio-reactor for wastewater treatment at ambiente temperature. **Chemical Engineering Journal**, v 284, p. 130–138, 2016.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F.; **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, v 6, p. 483, 2001.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 755-781, 2008.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A.; A disposição de lodo de esgoto em Solo Agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, Cap 2, p. 243-254, 2006.

BI, W.; LI, Y.; HU, Y.; Recovery of phosphorus and nitrogen from alkaline hydrolysis supernatant of excess sludge by magnesium ammonium phosphate. **Bioresource Technology**, v 166, p. 1-8, 2014.

BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B.; Dinâmica da mineralização de nitrogênio de lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, Cap 7, p. 125-136, 2006.

EGLE, L.; RECHBERGER, H.; ZESSNER, M. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater. Resources, **Conservation and Recycling**, v 105, p. 325–346, 2015.

ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; TAO, Y.; VAN LIER, J.B. Aplicability of dynamic membrane technology in aerobic membrane bioreactor. **Water Research**, v 48, p. 420-429, 2014.

FENG, L.; WANG, H.; CHEN, Y.; WANG, Q. Effect of solids retention time and temperature on waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under alkaline conditions in continuous-flow reactors. **Bioresource Technology**, v 100, p. 44– 49, 2009.

FERNANDES, F; SOUZA, S. G. Estabilização de lodo de esgoto. in: **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Curitiba-PR: PROSAB, Cap 2, p. 29-55, 2001.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características dos biossólidos. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**/Organizado [por] Aderlene Inês de Lara, Andréia Cristina Ferreira, Cleverson Vitório Andreoli, Eduardo Sabino Pegorini, Ricardo Germano Kurten Ihlenfeld. Curitiba: PROSAB/ SANEPAR,1999.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: **Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, p. 443, 1999.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente. --- Belo Horizonte: FEAM, 163 p. 2012.

GERNER, G.; MEYER, L.; WANNER, R.; KELLER, T.; KREBS, R. Sewage Sludge Treatment by Hydrothermal Carbonization: Feasibility Study for Sustainable Nutrient Recovery and Fuel Production. **Energies**, v **14**, n 9, p. 1 – 12, 2021.

GIENAU, T.; BRÜß, U.; KRAUME, M.; ROSENBERGER, S. Nutrient recovery from anaerobic sludge by membrane filtration: pilot tests at a 2.5 MWe biogas plant. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v 7, p. 325–334, 2018.

GUAN, D.; DAI, J.; WATANABE, Y.; CHEN, G. Changes in the physical properties of the dynamic layer and its correlation with permeate quality in a self-forming dynamic membrane bioreactor. **Water Research**, v 140, p. 67-76, 2018.

GURJE, W. and ZEHNDER, A. J. B. Conversion processes in anaerobic digestion. **Water Science & Technology**, v. 15, p. 127-167, 1983.

HOGENDOORN, A.; Enhanced digestion and alginate-like-exopolysaccharides extraction from Nereda sludge. Delft, 2013.

HU, Y.; WANG, X C.; NGO, H H.; SUN, Q.; YANG, Y. Anaerobic dynamic membrane bio-reactor (AnDMBR) for wastewater treatment: A review. **Bioresource Technology**, v 247, p. 1107–1118, 2018.

KOOIJMAN, G.; DE KREUK, M. K.; VAN LIER, J. B. Influence of chemically enhanced primary treatment on anaerobic digestion and dewaterability of waste sludge. **Water Science Technology**, v 76, p. 1629-1639, 2017.

KUGLARZ, M.; KARAKASHEV, D.; ANGELIDAKI, I. Microwave and thermal pretreatment as methods for increasing the biogas potential of secondary sludge from municipal wastewater treatment plants. **Bioresource Technology**, v 134, p. 290-297, 2013.

LIN, H.; PENG, W.; ZHANG, M.; CHEN, J.; HONG, H. ZHANG, Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. **Desalination**, v 314, p. 169-188, 2013.

LOPES, W. S.; LUNA, Y. H. D. M; SOUSA, J. T.; LOPES, W. S.; LEITE, V. D. Evaluation of acidogenic sludge from anaerobic reactors running at low solids retention times to reduce sludge generation and enhance biogas production. **Water SA**, v. 45, n. 4, p. 632 – 637, 2019.

MEABE, E.; DÉLÉRIS, S.; SOROA, S.; SANCHO, L. Performance of anaerobic membrane bioreactor for sewage sludge treatment: Mesophilic and thermophilic processes. **Journal of Membrane Technology**, v 446, p. 26-33, 2013.

METCALF & EDDY. Inc. Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse. 4. ed. New York, McGraw - Hill Book, 1815p. 2003.

METCALF & EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C.; Tratamento da fase sólida em Estação de Tratamento de Esgoto – Condicionamento, desaguamento mecanizado

e secagem térmica do lodo. In: Usos alternativos de lodo de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto. **PROSAB**, Cap. 4, p. 48-108, 2006.

MUNHOZ, R. O.; BERTON, R. S.; Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, cap 6, p. 91-124, 2006.

OZGUN, H.; ERSAHIN, M.E.; TAO, Y. SPANJERS, H.; VAN LIER, J. B. Effect of upflow velocity on the effluent membrane fouling potential in membrane coupled upflow anaerobic sludge blanket reactors. **Bioresource Technology**, v 147, p. 285-292, 2013.

PARK, C. and NOVAK, J. T.; Characterization of activated sludge exocellular polymers using several cation-associated extraction methods. **Water Research**, v 41, p. 1679–1688, 2007.

ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. **Revista DAE**, edição nº 198, p. 25 – 62, 2015.

SHENG, G. P.; YU, H. Q.; LI, X. Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. **Biotechnology Advances**, v 28, p. 882–894, 2010.

SKOUTERIS, G.; HERMOSILLA, D.; LÓPEZ, P.; NEGRO, C.; BLANCO, A. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. **Chemical Engineering Journal**, v 198-199, p. 138-148, 2012.

SMITH, A.L.; SKERFLOS, J.S.; RASKIN, L. Psychrophilic anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater. **Water Research**, v 47, p. 1655-1665, 2013.

SOUSA, T. A. T.; MONTE, F. P.; SILVA, J. V. N.; LOPES, W. S.; LEITE, V. D.; VAN LIER, J. B.; SOUSA, J. T. Alkaline and acid solubilisation of waste activated sludge. **Water Science & Technology**, v 83, n 12, p. 2980 – 2996, 2021.

STRONG, P.J.; MCDONALD, B., GAPES, D.J. Combined thermochemical and fermentative destruction of municipal biosolids: a comparison between thermal hydrolysis and wet oxidative pre-treatment. **Bioresource Technology**. v. 9, p. 5520 – 5527, 2011.

STUCKEY, D.C. Recent developments in anaerobic membrane reactors. **Bioresource Technology**, v 122, p. 137-148, 2012.

TEOH, S. K. E LI, L. Y. Feasibility of Alternative Sewage Sludge Treatment Methods from a Lifecycle Assessment (LCA) Perspective. **Journal of Cleaner Production**, v 247, 2020.

TORRES, A.; HEMMELMANN, A.; VERGARA, C.; JEISON, D. Application of two-phase slug-flow regime to control flux reduction on anaerobic membrane bioreactors treating wastewaters with high suspended solids concentration. **Separation and Purification Technology**, v 79, p. 20-25, 2011.

TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Biossólidos na Agricultura**. São Paulo, SP, p.468, 2002.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGA, G. Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente. Campina Grande: Epgraf, p. 240, 1994.

VAN HAANDEL, A.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, Composição e Constituição do lodo. In: Biossólidos - **Alternativas de Uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006, p. 417, 2006.

VAN LIER, J. B.; MAHMOUD, N AND ZEEMAN, G. Anaerobic Wastewater Treatment. In: Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. Edited by HENZE, M.; VAN LOOSDRECHT, M C. M.; EKAMA, G. A. and BRDJANOVIC, D. Published by IWA Publishing, London, UK, Cap 16, p. 401-442, 2008.

VOLPE, M.; FIORI, L.; MERZANI, F.; MESSINEO, A.; ANDREOTTOLA, G. Hydrothermal Carbonization as an Efficient Tool for Sewage Sludge Valorization and Phosphorous Recovery. **Chemical Engineering Transactions**, v 80, p. 199–204, 2020

VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, DESA-UFMG, v 1, p. 452. 1996.

XIE, X.; WANG, Z.; WANG, Q.; ZHU, C.; WU, Z. An anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for landfill leachate treatment: Performance and microbial community identification. **Bioresource Technology**, v 161, p. 29–39, 2014.

XU, J.; YUAN, H.; LIN, J.; YUAN, W.; Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to enhance anaerobic biogas production. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v 45, p. 2531–2536, 2014.

ZHANG, X.; WANG, Z.; WU, Z.; WEI, T.; LU, F.; TONG, J.; ZANG, L. Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal**, v 165, p. 175-183, 2010.