

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Guilherme Henrique da Silva Urbano

**Potencial de Recuperação de Biopolímeros do Lodo Aeróbio em um Sistema de  
Tratamento de Efluentes em Escala Real**

Florianópolis

2023

Guilherme Henrique da Silva Urbano

**Potencial de Recuperação de Biopolímeros do Lodo Aeróbio em um Sistema de  
Tratamento de Efluentes em Escala Real**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico  
da Universidade Federal de Santa Catarina como  
requisito para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Sanitária e Ambiental  
Orientador: Dr Nelson Libardi Junior

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Urbano, Guilherme Henrique da Silva

Potencial de Recuperação de Biopolímeros do Lodo Aeróbio em um Sistema de Tratamento de Efluentes em Escala Real / Guilherme Henrique da Silva Urbano ; orientador, Nelson Libardi Junior, 2023.

58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Biopolímeros. 3. EPS. 4. Recuperação de recursos. I. Junior, Nelson Libardi. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Guilherme Henrique da Silva Urbano

**Potencial de Recuperação de Biopolímeros do Lodo Aeróbio em um Sistema de Tratamento de Efluentes em Escala Real**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 24 de Julho de 2023.



Documento assinado digitalmente  
**Maria Elisa Magri**  
Data: 25/07/2023 21:01:32-0300  
CPF: \*\*\*.011.369-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Elisa Magri, Dr<sup>a</sup>.  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
**Nelson Libardi Junior**  
Data: 25/07/2023 21:58:56-0300  
CPF: \*\*\*.684.639-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Aline Alves Freitas, Dra.  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais e avós, que me deram todo o suporte para que eu chegasse até aqui

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz Paulo Urbano Junior e Daniela da Silva, pelo dom da vida, amor e solicitude.

Aos meus avós maternos, José da Silva e Maria das Graças Silva, por me acolheram quando eu mais precisei.

À toda a minha família e amigos que sempre me apoiaram.

Aos amigos que fiz na UFSC, levarei como herança.

Ao meu orientador Nelson, compreensivo e sempre solícito em me ajudar. Devo-lhe muito pela conclusão desse trabalho.

À Aline Alves, Amábil Cabral e Nathan Pacheco, por me auxiliarem em muitos momentos nas rotinas laboratoriais.

Ao corpo técnico e docente do ENS, grandes profissionais e pessoas boníssimas.

À UFSC em sua totalidade, com os colaboradores e estrutura, que permitiram o meu desenvolvimento não só como profissional, mas como cidadão.

E a todos aqueles que compartilharam dessa caminhada comigo, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A manutenção da qualidade ambiental dos recursos hídricos e a proteção da saúde humana, são os motivos pelos quais o tratamento das águas residuárias é aplicado. Atualmente, os problemas ambientais antropogênicos criaram uma demanda mundial a fontes de matérias primas, trazendo sobre os resíduos gerados um potencial meio de obter recursos. O lodo biológico gerado nas estações de tratamento de efluentes possui substâncias com valor econômico agregado, como as substâncias poliméricas extracelulares (EPS). Seus polímeros possuem capacidade de formar hidrogéis, conferindo-o características de um espessante, usado em diversos tipos de indústrias. Também possui substâncias que o tornam um fertilizante para agricultura. Esse lodo é comumente descartado em aterros sanitários, porém, ainda é passível de recuperação. Portanto, esse trabalho tem como objetivo caracterizar e quantificar o EPS de lodo aeróbio em um sistema biológico de tratamento de efluentes de uma estação de tratamento de esgotos (ETE). O método de extração usado consiste em solubilizar o EPS em condições alcalinas, agitação e a altas temperatura. A extração foi realizada à 80°C e 50°C, a fim de avaliar a interferência da temperatura na solubilização do EPS e seus componentes, como proteínas (PN), polissacarídeos (PS) e ácidos húmicos. O rendimento de EPS foi baixo, devido a determinação em função dos SSV. A distribuição qualitativa não variou, mas as diferenças percentuais foram substanciais entre as duas estratégias, onde a extração a 80°C apresentou maiores concentrações PN, PS e ácidos húmicos. A análise qualitativa e quantitativa do EPS mostrou que há viabilidade para a transformação da ETE em uma unidade de recuperação de recursos.

**Palavras-chave:** Biopolímeros, lodo aeróbio, recuperação de recursos

## ABSTRACT

Maintaining the environmental quality of water resources and protecting human health are the reasons why wastewater treatment is applied. Currently, anthropogenic environmental problems have created a worldwide demand for sources of raw materials, bringing the waste generated into a potential means of obtaining resources. The biological sludge generated in effluent treatment plants contains substances with added economic value, such as extracellular polymeric substances (EPS). Its polymers have the ability to form hydrogels, giving it the character of a thickener, used in various types of industries. It also has substances that make it a fertilizer for agriculture. Therefore, this work aims to characterize and quantify the EPS of aerobic sludge in a biological effluent treatment system from a WWTP. The extraction method used consists of EPS solubilization in alkaline conditions, agitation and high temperature. The extraction was carried out at 80°C and 50°C, in order to evaluate the interference of temperature in the solubilization of EPS and its components, such as proteins (PN), polysaccharides (PS) and humic acids. The yield of EPS was low, due to the determination as a function of the VSS. The qualitative distribution did not vary, but the percentage differences were substantial between the two strategies, where extraction at 80°C showed higher concentrations of PN, PS and humic acids. The qualitative and quantitative analysis of the EPS showed that it is feasible to transform the WWTP into a resource recovery unit.

**Keywords:** Biopolymers, aerobic sludge, resource recovery



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Representação esquemática de um reator UASB .....	21
Figura 02 – Reator UASB seguido por lodo ativado.....	23
Figura 03 – Foto de satélite da planta da ETE Lagoa da Conceição. ....	28
Figura 04 – Fluxograma de operação da ETE Lagoa da Conceição. ....	29
Figura 05 – Licor misto armazenado.....	30
Figura 06 – Bancada experimental para serie de sólidos.....	31
Figura 07 – Lodo centrifugado em tubo falcon. ....	33
Figura 08 – Fluxograma do processo de extração de EPS. ....	34
Figura 09 – EPS Solubilizado (sobrenadante) e ALE na forma ácida (precipitado).....	35
Figura 10 – Comparação dos teores de sólidos do EPS entre as diferentes estratégias. ....	30
Figura 11 – Comparação entre o rendimento de EPS entre as diferentes estratégias.....	31
Figura 12 – Concentração de proteínas e ácidos húmicos no EPS.....	32
Figura 13 – Concentração de polissacarídeos no EPS.....	33
Figura 14 – Componentes quantificados do EPS .....	35
Figura 15 – Teste de reticulação do ALE de EPS (80°C). ....	36
Figura 16 – Teste de reticulação do ALE de EPS (50°C). ....	36
Figura 17 – Curva padrão proteínas. ....	46
Figura 18 – Curva padrão ácidos húmicos. ....	47
Figura 19 – Curva padrão ácido glucurônico. ....	48
Figura 20 – Curva padrão glicose.....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Tipos de crescimento e sistemas.....	19
Quadro 02 – Principais processos e operações unitários de tratamentos .....	20

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Teor de sólidos e umidade do licor misto.....	28
Tabela 02 – Densidades e massa específica do lodo licor misto.....	28
Tabela 03 – Teor de sólidos e umidade do lodo centrifugado.....	29
Tabela 04 – Série de sólidos em suspensão e IVL.....	29
Tabela 05 – Teor de sólidos do EPS (*N=4).....	30
Tabela 06 – Dados numéricos das concentrações dos componentes do EPS (*N=4).....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALE – *Alginate-like exopolymers* (polímeros extracelulares semelhantes ao alginato)

BSA – *Bovine Serum Albumin* (Albumina de soro bovino)

C/N – Razão carbono nitrogênio

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente

EPS – *Extracellular polymeric substances* (substâncias poliméricas extracelulares)

ETE – Estação de tratamento de esgotos

LABEFLU – Laboratório de efluentes líquidos e gasosos

LGA – Lodo granular aeróbio

MBR – Reator biológico a membranas

PAC - Policloreto de alumínio

PN – Proteínas

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PS – Polissacarídeos

RBS – Reator de batelada sequencial

RBSG – Reator em batelada sequencia granular

SF – Sólidos Fixos

SSF – Sólidos suspensos Totais

SST – Sólidos suspensos Totais

SSV – Sólidos suspensos Voláteis

ST – Sólidos totais

SV – Sólidos voláteis

UASB – *Upflow anaerobic sludge blanket* (reator anaeróbio de fluxo ascendente)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS .....	18
2.2	PROCESSOS ANAERÓBIOS E AERÓBIOS COMBINADOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES .....	20
2.3	TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ESGOTOS.....	24
2.4	RECUPERAÇÃO DE BIORRECURSOS .....	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1	LEVANTAMENTO DE DADOS DA ETE LAGOA DA CONCEIÇÃO .....	28
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO LODO .....	29
3.2.1	<b>Coleta e caracterização do lodo.....</b>	<b>29</b>
3.2.2	<b>Caracterização do licor misto .....</b>	<b>30</b>
3.2.3	<b>Caracterização do lodo centrifugado .....</b>	<b>32</b>
3.3	RECUPERAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS DO LODO .....	34
3.3.1	<b>Extração de EPS .....</b>	<b>34</b>
3.3.2	<b>Série de sólidos e rendimento .....</b>	<b>35</b>
3.3.3	<b>Concentração de proteínas e ácidos húmicos.....</b>	<b>35</b>
3.3.4	<b>Concentração de ácido glucurônico e glicose .....</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>28</b>
4.1	SÉRIE DE SÓLIDOS, UMIDADE E IVL DO LODO .....	28
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO EPS .....	30
4.2.1	<b>Teor de sólidos e rendimento .....</b>	<b>30</b>
4.2.2	<b>Concentração de proteínas (PN) e polissacarídeos (PS) e ácidos húmicos .....</b>	<b>31</b>

<b>4.2.3</b>	<b>Teste de reticulação .....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>38</b>
	<b>ANEXO A – ESPECTRO PROTEÍNAS .....</b>	<b>46</b>
	<b>ANEXO B – ESPECTRO POLISSACARÍDEOS.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos é um fator importante para manter a qualidade dos recursos hídricos e da saúde pública. Em todo o território nacional, o índice de coleta e tratamento de esgoto sanitário é de 43,45%, apenas coleta de 18,20% e não coletado de 26,38% (ANA, 2017). A nível estadual esses índices variam muito em função dos modais de tratamento aplicados e dos investimentos recebidos, no entanto, esses dados evidenciam o grande avanço que o Brasil precisa ter rumo a universalização do saneamento básico, inclusive do tratamento e a disposição final adequados dos resíduos do tratamento dos esgotos sanitários.

O processo de tratamento do esgoto sanitário ocorre nas estações de tratamento de efluentes e gera como um subproduto o lodo. Nos dias atuais, a quantidade do lodo gerado no processo de tratamento do esgoto sanitário tem aumentado, principalmente por causa do processo de urbanização e o aumento dos investimentos em saneamento básico. Esses fatores têm contribuído para gerar preocupações quanto a destinação final ambientalmente adequada do lodo (SILVA et al., 2015).

O termo lodo é utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. Nos processos biológicos de tratamento, a fração orgânica é absorvida e convertida, originando a biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). A destinação final do lodo residual que é gerado nas estações de tratamento é um grande problema econômico e ambiental para as empresas de saneamento, públicas ou privadas (METCALF & EDDY, 2016).

De acordo com Andreoli; Von Sperling; Fernandes, (2014), o lodo pode representar até 2% do volume de esgoto tratado e o custo do seu gerenciamento ultrapassar 50% do total gasto com a operação de uma estação. Com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei N°12.305 de 2010, houve a introdução ao incentivo, em termos legais, às atividades das indústrias de reciclagem para recuperação de matéria prima, além de ter como objetivo os princípios de não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, e sua destinação ambientalmente adequada. As destinações finais mais aplicadas para o lodo são os aterros sanitários e incineração (LEE, 2011), no entanto, a PNRS orienta que somente os rejeitos devem ser destinados aos aterros sanitários, sendo o lodo ainda passível de processos que visam recuperação de recursos e, também, o reuso na agricultura.

No Brasil, as tecnologias de sistemas de tratamento de efluentes mais aplicadas são o lodo ativado e os reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Segundo Chernicharo et al. (2018), nos estados do Distrito Federal, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Santa Catarina e São Paulo, as tecnologias de lodos ativados e reatores UASB atendem ao tratamento de esgoto sanitário de 35% e 30% da população, respectivamente. Ambas as tecnologias usam o princípio de biomassa suspensa, que ao final do processo de tratamento gera o lodo biológico.

Esse lodo biológico possui substâncias com potencial valor econômico. Dentre elas está a matriz de substâncias poliméricas extracelulares (EPS), onde o exopolímero ALE (alginate-like exopolymers) é abundante, e suas propriedades físicas possuem interesses para aplicabilidade em atividades industriais do ramo da construção civil, farmacêutica, papel e alimentos, bem como para a agricultura e biofloculantes para sistemas de tratamento de águas residuárias (AMIN VIEIRA; LIBARDI; RIBEIRO DA COSTA, 2022; SCHAMBECK et al., 2020; XIAO; ZHENG, 2016). A quantidade e composição do EPS pode variar em função da metodologia de extração aplicada (FELZ et al., 2016), logo, a sua solubilização é uma etapa importante para análises posteriores (ADAV; LEE, 2008; HONG et al., 2017). Utilizando um método de extração de EPS com uma solução 0,2M de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (carbonato de sódio) e aquecimento, Cydzik-Kwiatkowska et al. (2022) avaliou o rendimento de ALE variando o volume da solução de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (80mL a 400mL), temperatura ( $50^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$ ) e tempo de extração (15 minutos a 60 minutos). A ideia de avaliar o rendimento do EPS e de seus componentes em diferentes condições de extração é voltada para a redução de custos energéticos na recuperação de biopolímeros em escala real.

Poucos estudos vêm sendo conduzidos a fim de caracterizar e avaliar o teor desses biopolímeros extracelulares no lodo biológico residual de estações de tratamento de esgotos (ETE). Logo, esse trabalho tem como objetivo quantificar o potencial de recuperação de biopolímeros de lodo aeróbio de sistemas biológicos de tratamento de efluentes em escala real.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de recuperação de biopolímeros de lodo aeróbio oriundo de sistemas biológicos de tratamento de efluentes em escala real.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterização física do lodo residual do processo tratamento aeróbio da ETE Lagoa da Conceição operada pela CASAN;
- Caracterização do EPS recuperado do lodo residual quanto ao seu teor de proteínas, ácidos húmicos e polissacarídeos.
- Avaliação do rendimento de EPS e seus componentes através da variação da temperatura do método de extração aplicado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

As águas residuárias são geradas através do consumo da água de abastecimento numa determinada comunidade com contribuições das atividades domésticas, industriais e infiltrações (METCALF & EDDY, 2016; VON SPERLING, 1996). Comumente chamada de esgoto, a água residuária sem o devido tratamento traz como principais problemas os riscos à saúde humana e o incômodo ao bem estar olfativo devido aos maus odores. O acúmulo e a condição séptica do esgoto gera a produção de odores e situações desagradáveis, além da alta quantidade de organismos patogênicos oriundos do intestino humano (METCALF & EDDY, 2016).

O risco e o incômodo gerado pelo esgoto às aglomerações humanas é conhecido há muito tempo, como também a sua capacidade de ser utilizado para fertilizar a terra. Desde a dinastia Xihan (202 a.C) até a década de 1970, grande parte das terras agricultáveis na China eram fertilizadas com fezes humanas. Na Europa do século IV ao XVIII, tempo conhecido como idade das trevas sanitárias, o descarte de resíduos sólidos e líquidos era feito majoritariamente nas ruas, simplesmente lançando-os das janelas (MIKI et al., 2022). Nesse período algumas soluções foram implementadas, mas apenas com o objetivo principal de amenizar os odores desagradáveis. No século XIII, o rei Filipe Augusto ordenou que as estradas da cidade de Paris fossem pavimentadas para reduzir o mau cheiro causado pelo resíduo sólido e esgoto, porém, com a estrada pavimentada parte dos dejetos não se transformavam em lama. No ano de 1348 o rei Filipe VI, formou o primeiro grupo de trabalhadores do saneamento para limpar as ruas (LENS; ZEEMAN; LETTINGA, 2015).

No início do século XIX, houve o surgimento dos sistemas de coleta de esgoto pela necessidade de acabar com os maus odores, e bem visto pelos agricultores das cidades, pois o usavam como fertilizante. Após coletado, o esgoto era simplesmente espalhado no solo. Com a expansão das áreas urbanas, tornou-se inviável economicamente a aquisição de terras nas proximidades das cidades, além dos contínuos alagamentos e o baixo padrão de higiene da aplicação (MIKI et al., 2022). Com a necessidade de desenvolver novas formas de tratamento para acelerar as forças da natureza, a ideia de utilizar ‘organismos’ começou a ser especulada gradualmente (LENS; ZEEMAN; LETTINGA, 2015; METCALF & EDDY, 2016).

Desde então, para tornar os sistemas mais eficientes, os processos biológicos de tratamento de efluentes aplicados nos dias atuais foram sendo desenvolvidos e aprimorados ao longo dos anos. Dentre esses processos, os de crescimento suspenso e aderido são os mais aplicados, conforme o quadro 01. No processo de crescimento suspenso os microrganismos se desenvolvem em suspensão no meio líquido, e no crescimento aderido o desenvolvimento microbiano ocorre aderido ao material suporte com a passagem do líquido, tendo os microrganismos como os principais agentes na transformação da matéria orgânica biodegradável e na incorporação de sólidos em suspensão (METCALF & EDDY, 2016).

Quadro 01 – Tipos de crescimento e sistemas.

Processo	Sistema
Crescimento Suspenso	Lodos ativados e variantes
	Lagoas de estabilização e variantes
	Reator anaeróbico de fluxo ascendente (recebendo esgoto com sólidos em suspensão)
Crescimento aderido	Filtro biológico
	Biofiltro
	Filtro anaeróbico
	Sistemas de disposição no solo

Fonte: Adaptado Von Sperling (2016a)

O nível de tratamento necessário para o lançamento do efluente tratado, seja ele de origem doméstica ou industrial, levará em consideração as características dos poluentes, dos padrões legais de lançamento e da qualidade das águas dos corpos hídricos receptores estabelecidos pelas legislações ambientais vigentes no ambiente federal e estadual (CAVALCANTI, 2016). Atualmente no Brasil, a resolução CONAMA nº 357 e nº 430 dispõem sobre a classificação dos corpos de água e as condições e os padrões de lançamento de efluentes, respectivamente. Para o Estado de Santa Catarina, a resolução CONSEMA nº 182 estabelece as diretrizes para os padrões de lançamento de esgotos sanitário de sistemas de tratamento públicos e privados.

A água residuária possui uma grande variedade de poluentes que podem ser caracterizados de acordo com as suas propriedades físicas e de seus componentes químicos e biológicos (METCALF & EDDY, 2016). A partir da caracterização, o tratamento pode ser

definido aplicando métodos de operação unitária onde as forças físicas atuam, e processos unitários onde a remoção dos contaminantes é realizada por reações químicas ou atividades biológicas de microrganismos (CAVALCANTI, 2016). Esses processos são comumente utilizados de maneira simultânea a fim de potencializar e otimizar o tratamento do efluente. Exemplos de processos e operações são mostrados no quadro 02, a seguir:

Quadro 02 – Principais processos e operações unitários de tratamentos aplicados a contaminantes.

<b>Contaminantes</b>	<b>Processos e operações unitários</b>	<b>Contaminantes</b>	<b>Processos e operações unitários</b>
Óleos e graxas	Separação por gravidade	Nitrogênio	Tratamentos biológicos
	Flotação		Stripping de amônia
	Filtração por membrana		Troca iônica
Sólidos em suspensão	Peneiramento		Orgânicos refratários
	Remoção de Areia	Adsorção com carvão ativado	
	Sedimentação	Precipitação química	
	Filtração	Tratamento oxidativos avançados	
	Flotação	Incineração	
	Coagulação/Sedimentação	Patógenos	Cloração
Orgânicos biodegradáveis	Reatores aeróbios		Hipocloração
	Filtros biológicos		Ozonização
	Reatores biológicos rotativos		UV
	Sistemas de Lagoas		Metais pesados
	Reatores anaeróbios	Troca iônica	
Orgânicos voláteis	Stripping	Sólidos dissolvidos	Troca iônica
	Adsorção em carvão ativado		Osiose reversa
Fósforo	Coagulação		Eletrólise reversa
	Tratamento biológico		Eletroneionização

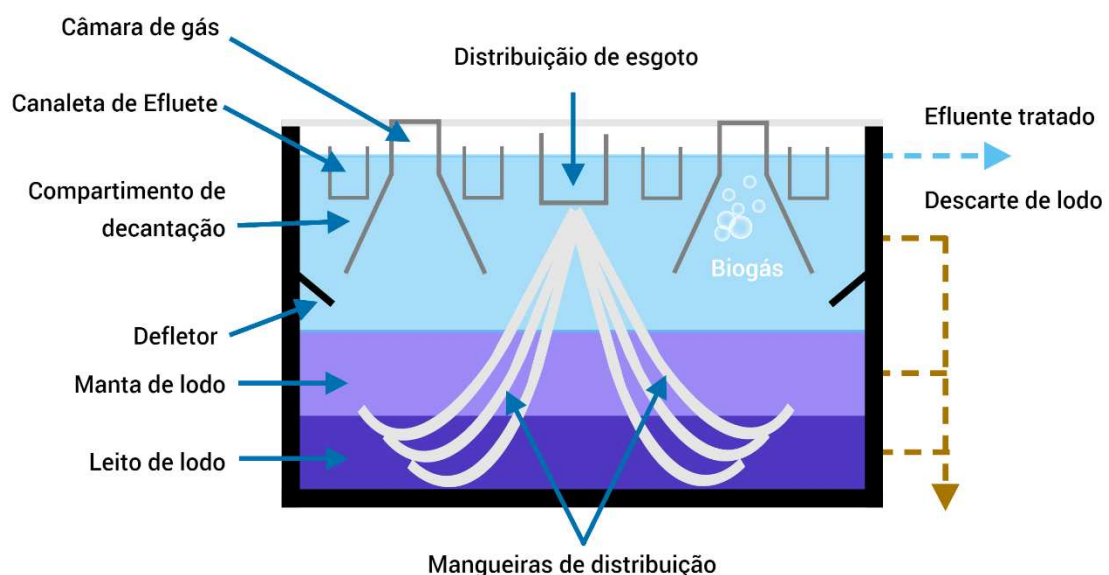
Fonte: Adaptado Cavalcanti (2016)

## 2.2 PROCESSOS ANAERÓBIOS E AERÓBIOS COMBINADOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre em diversos ambientes naturais onde há disponibilidade de material orgânico e baixo potencial de redução-oxidação (ausência de oxigênio), tendo como resultado a estabilização da matéria orgânica e a produção de biogás como seu subproduto principal, composto predominantemente de metano (CH<sub>4</sub>) e

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (MIKI et al., 2022). Dentre todas as tecnologias que utilizam o processo de digestão anaeróbia, os reatores UASB são amplamente utilizados para o tratamento de efluente doméstico e despejos industriais altamente biodegradáveis (CHERNICHARO, 2007) por suas diversas características favoráveis como baixa produção de sólidos; baixo consumo de energia; construção e operação simples; tolerância a elevadas cargas orgânicas; estabilização do lodo no próprio reator; operação com menor tempo de detenção hidráulico e um maior tempo de retenção celular (CORNELLI et al., 2014; OLIVEIRA; AZEVEDO; CAVALCANTI, 2021). Em uma única unidade, o reator UASB é capaz de reter sólidos em suspensão, degradar compostos orgânicos, clarificar o efluente e realizar a digestão (estabilização) de lodo. Conforme a figura 1, o esgoto é distribuído de forma homogênea por mangueiras ou tubos, percorrendo um fluxo ascensional do fundo até as canaletas para a coleta do efluente clarificado. Conforme o esquema da figura 01, o contato e a mistura do efluente com o leito e a manta de lodo é induzido pelo fluxo e bolhas de gases, promovendo uma assimilação mais eficiente dos componentes orgânicos pelas bactérias presentes na zona de reação (CHERNICHARO, 2007).

Figura 01 - Representação esquemática de um reator UASB para tratamento de esgoto doméstico. Os aspectos de projeto mais importantes são indicados.

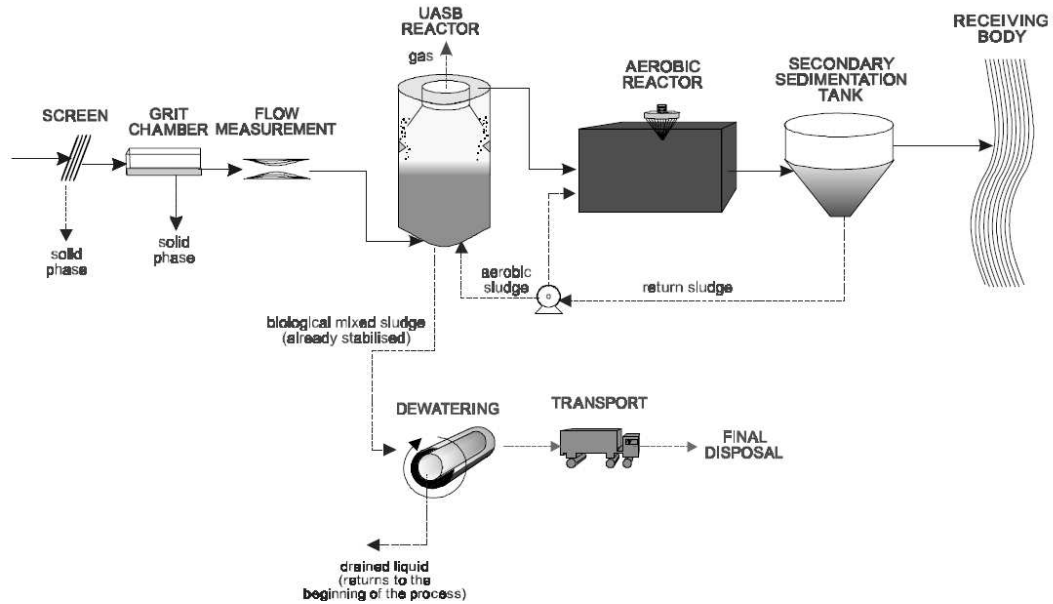


Fonte: Adaptado Miki et al. (2022)

Os reatores UASB possuem muitas características positivas que o tornam uma alternativa altamente cobiçada para projeto de ETE, porém, os sistemas anaeróbios possuem dificuldades em produzir um efluente que se enquadre nos parâmetros legais estabelecidos pelas legislações ambientais vigentes. Com isso, o pós tratamento desse efluente é aplicado com a função de remover residuais de matéria orgânica e constituintes pouco afetados, como nutrientes e patógenos (CHERNICHARO, 2007). Dentre todos os processos aplicáveis para o pós tratamento, o lodo ativado é amplamente utilizado pois é capaz de alcançar altas eficiências na remoção de matéria orgânica e nutrientes. O processo funciona através da assimilação de compostos orgânicos e inorgânicos existentes no efluente, por meio da atividade de biomassa mantida em suspensão em meio aeróbio (TAMBURUS, 2020). A eficiência é dependente da capacidade de floculação e sedimentação da biomassa. Esses flocos são formados por bactérias, fungos, protozoários e micrometazoários, sendo as bactérias as principais agentes responsáveis pelo consumo de matéria carbonácea e pela estabilidade dos flocos (BENTO et al., 2005)

Muitas variações do processo lodos ativados foram desenvolvidas e podem ser classificadas quanto a idade do lodo, fluxo da massa líquida e característica do afluente recebido à etapa biológica (VON SPERLING, 2016b). A princípio, o lodo ativado tem como elementos fundamentais o tanque de aeração, promovendo a degradação dos poluentes por meio de uma grande concentração de flocos microbianos, em série com o decantador que promove a separação dos flocos e permite um certo grau de adensamento da biomassa sedimentada, onde parte será recirculada – bactérias ainda ativas capazes consumir matéria orgânica – para o tanque de aeração e o excedente descartado (SANT'ANNA JR, 2011; VON SPERLING, 2016b). A partir dessas características o processo de lodo ativado é aplicado para polir o efluente do reator UASB.

Figura 02 – Reator UASB seguido por lodo ativado



Fonte: Von Sperling (2016b)

O lodo excedente do reator aeróbico pode ser enviado ao leito do reator UASB, já que o processo anaeróbico possui a capacidade de estabilizar a biomassa aeróbia e reduzir custos no gerenciamento do lodo aeróbico. O sistema de lodo ativado necessita de uma operação cautelosa, pois os microrganismos são sensíveis às variações de parâmetros operacionais, como idade do lodo, vazões de recirculação, relação carbono/nitrogênio (C/N) e concentração de oxigênio dissolvido (ALVES, 2019). Em sistemas de lodos ativados desenvolvidos para remover nutrientes, o pré-tratamento anaeróbico pode alterar a dinâmica de remoção do nitrogênio no tanque de aeração, pelo fato de gerar uma redução significativa na concentração de matéria orgânica carbonácea e provocar o desequilíbrio da relação C/N ideal. Como efeito, a capacidade de desnitrificação no tanque de aeração pode ficar comprometida e, conseqüentemente, acontecer no decantador secundário, gerando a suspensão do lodo devido a formação de gases (ALVES, 2019; VAN HAANDEL, 2012). O envio de lodo excedente da etapa aeróbia ao reator UASB pode ser um problema recorrente. Buntner; Spanjers; Van Lier (2014), mencionaram que a atividade metanogênica foi reduzida a mais de 20% quando porções maiores de 10% de lodo aeróbico em relação ao volume de lodo anaeróbico eram adicionadas no Reator Biológico a Membranas (MBR) anaeróbico. Von Sperling (2016b), recomenda que haja experiencia em relação as estratégias de retorno de lodo excedente, pois problemas operacionais no reator UASB já foram reportados.

### 2.3 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ESGOTOS

Dos resíduos removidos pelo sistema de tratamento, o lodo é o que apresenta maior volume, e o seu processamento e destinação final são o problema mais complexo na operação, pois ele ainda apresenta uma grande parcela de material orgânico passíveis de riscos ao meio ambiente e alto teor de umidade (METCALF & EDDY, 2016). A finalidade do gerenciamento do lodo é obter um produto mais estável, com menor volume para facilitar seu manuseio e reduzir os custos nos processos subsequentes (PEDROZA et al., 2010).

De acordo com Von Sperling, Gonçalves (2014), a geração de lodo na planta de tratamento irá depender das características dos processos aplicados na ETE, sendo o lodo passível da seguinte classificação: (1) lodo primário, sendo os sólidos removidos por sedimentação em decantadores primários; (2) lodo secundário, caracterizado pela biomassa desenvolvida no tanque biológico; (3) lodo misto, mistura entre o lodo primário e secundário enviados ao processamento; (4) lodo químico, gerado a partir de precipitação química para melhorar a sedimentabilidade no decantador primário e remoção de fosforo no lodo ativado.

A partir da avaliação das características do lodo gerado, as etapas para o seu gerenciamento usualmente aplicadas (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014), são listadas a seguir:

- Adensamento: Remoção da umidade para redução do volume;
- Estabilização: Remoção da matéria orgânica;
- Condicionamento: Preparação para a desatracação;
- Desaguamento: Remoção de umidade.

O adensamento é aplicado em lodos onde a biomassa não está estabilizada e realizado de forma mecanizada em prensas ou em adensadores por gravidade (CAVALCANTI, 2016; LUDUVICE, 2014). A estabilização de lodos acontece naturalmente, tanto em sistemas aeróbios quanto em sistemas anaeróbios. No lodo ativado de aeração prolongada, as condições de baixa carga e idade de lodo alta favorecem a respiração endógena – consumo de material orgânico do protoplasma celular – tornando o lodo menos volátil e com uma concentração de sólidos inorgânicos maior (LUDUVICE, 2014). Em sistemas anaeróbios, a biomassa possui como característica fundamental a atividade catabólica superior ao anabolismo (crescimento



celular), conferindo ao sistema pouca produção de lodo e mais produção de biogás através do consumo de material orgânico (MIKI, 2010). A finalidade do condicionamento de lodo é o aumento da capacidade de agregação dos sólidos para a etapa de desaguamento, obtida através da aplicação de polímeros e coagulantes (CAVALCANTI, 2016). O desaguamento de lodo tem como objetivo a retirada final de umidade do lodo estabilizado a fim reduzir os custos de transportes e disposição. A aplicação das diversas tecnologias disponíveis, mecanizadas ou naturais, irá depender da alternativa de disposição final, características operacionais e custos energéticos (CAVALCANTI, 2016).

A viabilidade das alternativas para a disposição final de lodos deve levar sempre em consideração os riscos e impactos ambientais com o intuito de garantir a proteção ambiental e saúde humana (LARA; ANDREOLI; PEGORINI, 2014). O simples fato de que o tratamento e disposição final do lodo de ETE é a etapa que mais gera custos, mostra a importância de agregar valor ao lodo, sendo ele uma fonte para a produção de energia ou um bioproduto.

## 2.4 RECUPERAÇÃO DE BIORRECURSOS

As atuais estações de tratamento de águas residuárias (ETAR) foram idealizadas e projetadas com o intuito de produzir efluentes de alta qualidade sem considerar os princípios de economia circular, com um elevado consumo de energia, grandes quantidades de geração de lodo, emissões de gases do efeito estufa e a ausência de recuperação de energia e recursos (ZHANG; LIU, 2022). Atualmente, os problemas ambientais antropogênicos criaram uma demanda mundial a fontes de matérias primas, trazendo sobre os resíduos gerados um potencial meio de obter recursos (VENKATA MOHAN et al., 2016).

No tratamento biológico de águas residuárias o EPS é produzido por microrganismos em lodos aeróbicos e anaeróbios quando o material orgânico presente na massa líquida é consumido (SHENG; YU, 2006). O EPS é uma substância “gelatinosa” caracterizada por uma mistura complexa de biopolímeros de alto peso molecular sintetizados e excretados por microrganismos, incluindo polissacarídeos, proteínas, lipídeos, ácidos nucleicos e substâncias húmicas (FELZ et al., 2016; SEVIOUR et al., 2019; SHENG; YU, 2006). Essas estruturas formam uma matriz tridimensional que interconecta as células bacterianas, conferindo proteção contra a ação de substâncias potencialmente tóxicas, estresse ambiental e hidráulico, e o armazenamento de energia para o fornecimento de fontes de carbono (CHEN et al., 2022; COSTA, 2021). O EPS é distribuído de acordo com sua condição solúvel (S- EPS) e ligado as

células (B-EPS) (SU et al., 2013). O ligado às células ainda é subcategorizado entre fortemente ligado e moderadamente ligado, sendo a parcela fortemente ligada mais abundante e responsável pelas propriedades do biofilme bacteriano, cujo EPS faz parte da composição além da comunidade microbiana (CHEN et al., 2022; SHENG; YU, 2006). O ALE é um dos principais polímeros funcionais responsáveis pela capacidade de formação de gel do EPS (LIN et al., 2010) possuindo características semelhantes ao polímero alginato, composto pelo grupo de polissacarídeos extraídos de algas marinhas marrons formados por monômeros de ácido alginico (D- manurônico e L- glucurônico) (COSTA, 2021). Em função da sua propriedade de formação de gel na presença de cátions divalentes, suas aplicações são variadas: espessante; estabilizante de emulsões e de espuma; agente de encapsulação; agente de gelificação; agente de formação de filmes e de fibras sintéticas (MÜLLER; SANTOS; BRIGIDO, 2011).

Nos países baixos, a limitação quanto a disposição final de lodo de esgotos foi um fator preponderante para o desenvolvimento de tecnologias de tratamento compactadas e com baixa geração de lodo, uma vez que os aterros sanitários não eram uma opção (MIKI et al., 2022). Coincidentemente, na Holanda um biopolímeros chamado “Kaumera” contendo ALE está sendo extraído de lodo granular aeróbio (LGA) e comercializado pelo mundo (CHEN et al., 2022). Esse material possui a capacidade de absorção e retenção de água possibilitando aplicações em fertilizantes para melhorar a absorção pelas plantas, e em aditivos para retardar a cura do concreto (KAUMERA, 2022). Em plantas de tratamento de efluentes em LGA, extração de EPS do excesso de lodo pode reduzir a quantidade de lodo descartado em até 35%, assim reduzindo significativamente a quantidade de lodo a gerenciar e, após a extração de EPS, o lodo residual tem melhor biodegradabilidade, tornando a digestão anaeróbica mais eficiente (CYDZIK-KWIATKOWSKA et al., 2022).

A recuperação de biopolímeros no Brasil a partir do aproveitamento de lodo ainda não acontece, no entanto, a aplicação de bioprodutos extraídos de macroalgas em culturas agrícolas já é uma realidade. Esse bioproduto é um extrato de algas marinhas vermelhas (*Kappaphycus alvarezii*), rico em nutrientes, aminoácidos e polissacarídeos, conferindo a cultura um melhor crescimento, proteção contra agentes patogênicos e maior resistências a condições ambientais extremas (ALGAS BRASIL, 2023). A carragenana é o nome dado ao conjunto de polissacarídeos extraídos de algas vermelhas e, juntamente com os alginatos e ágares, fazem parte de um grupo substâncias biopoliméricas denominadas ficocolóides (WEBBER, 2010). Assim como o alginato, a carragenana também possui propriedades de formação gel e diversas aplicações comerciais e industriais.

O Brasil é um dos maiores produtores de alimentos do mundo, bem como um grande consumidor de fertilizantes. Em 2020, o agronegócio brasileiro consumiu cerca de 40,6 milhões de toneladas de fertilizante, dos quais 32,9 milhões toneladas foram importadas (MAPA, 2022). Em território nacional, dezenas de milhares de toneladas de esgoto desaguado são produzidos e, boa parte desse recurso, não é aproveitado. O potencial para a criação de bioprodutos através do EPS de lodos é grande, frente as necessidades socioeconômicas e ambientais brasileiras atuais.

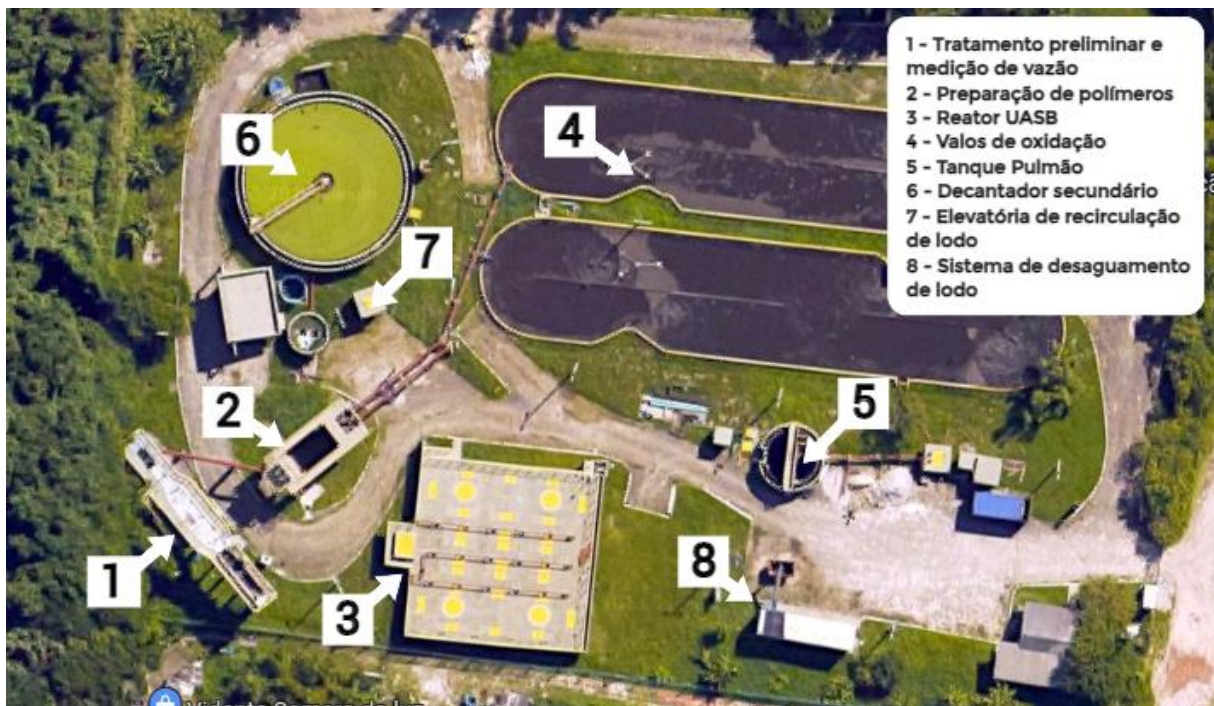
### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA ETE LAGOA DA CONCEIÇÃO

A estação de tratamento de esgoto (ETE), objeto de estudo deste trabalho, está localizada no município de Florianópolis – Santa Catarina, no bairro Lagoa da Conceição. Foram realizadas 3 visitas na ETE Lagoa da Conceição, no período de 31/01/2023 a 10/05/2023, para o levantamento de dados e coleta de amostras.

A estação tem capacidade para atender 37.000 habitantes, com uma vazã média de 50 L.s<sup>-1</sup> e máxima de 73 L.s<sup>-1</sup>. A unidades operacionais são mostradas na figura 03 a seguir:

Figura 03 – Foto de satélite da planta da ETE Lagoa da Conceição.

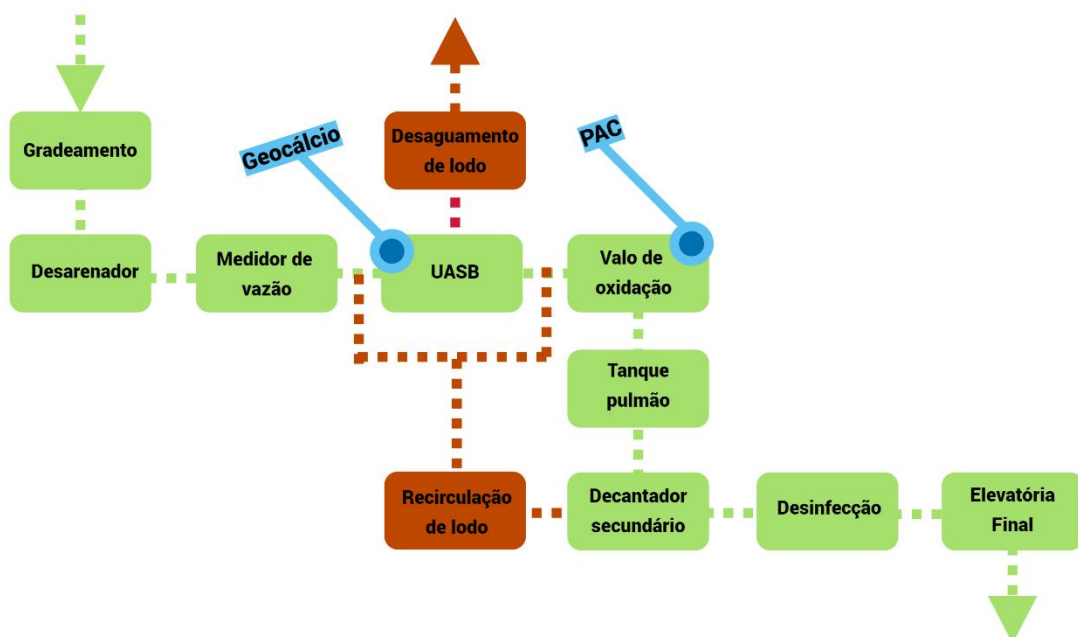


Fonte: Google Maps

O efluente que chega na estação é recalcado para o sistema de tratamento preliminar, passando pelo conjunto de gradeamento e desarenador antes da medição de vazão. Em seguida, parte por gravidade ao processo biológico composto pelo reator UASB e valos de oxidação. O efluente do valo de oxidação é encaminhado para o decantador secundário e o clarificado segue à desinfecção para ser lançado na lagoa de evapotranspiração. O policloreto de Alumínio (PAC) é um polímero inorgânico usado para realizar a precipitação de fósforo, sendo aplicado

diretamente nos valos de oxidação. Também é adicionado geocalcio (hidróxido de cálcio em suspensão aquosa) na saída do reator UASB a fim de regular o pH do efluente para o processo aeróbio. Durante o primeiro semestre de 2023, o sistema de desaguamento de lodo estava danificado e inoperante, sendo também realizada a instalação de um novo sistema mais moderno com adensadores e centrifugas. Apesar da inoperância do sistema de desaguamento, diariamente havia a retirada de 20 m<sup>3</sup> de lodo do reator UASB. O fluxograma citado é esquematizado na figura 04:

Figura 04 – Fluxograma de operação da ETE Lagoa da Conceição.



Fonte: Autor (2023)

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

### 3.2.1 Coleta e caracterização do lodo

O licor misto foi coletado na elevatória de recirculação de lodo da ETE Lagoa da Conceição nos dias 17/04/2023 (amostra 1) e 10/05/2023 (amostra 2) e armazenado nas dependências do Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU), no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Figura 05 – Licor misto armazenado.



Fonte: Autor (2023)

### 3.2.2 Caracterização do licor misto

No mesmo dia das coletas, o licor misto foi caracterizado através da análise da série de sólidos e com o teste de Índice Volumétrico de Lodo (IVL). O ensaio da série de sólidos foi realizado em triplicata de acordo com o Standart Methods (APHA, 2017). O volume de 50 mL de amostra foi colocado em cadinho de porcelana, previamente calibrado, e mantido em estufa (105°C) por um período de 24 horas e em seguida na mufla ( $\pm 550^{\circ}\text{C}$ ) por um período de 1 hora. Após a pesagem das amostras, foi possível realizar os cálculos de sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV) através das seguintes equações:

$$ST(mg.L^{-1}) = p1(mg) - p0(mg)/V(L) \quad (1)$$

$$SV(mg.L^{-1}) = p1(mg) - p2(mg)/V(L) \quad (2)$$

$$SF(mg.L^{-1}) = ST - SV \quad (3)$$

Onde:

$p_0$  = peso do cadinho;

$p_1$  = peso do cadinho + licor misto após 24h na estufa;

$p_2$  = peso do cadinho + licor misto após 1h na mufla.

A série de sólidos em suspensão segue o mesmo princípio, no entanto, devido ao alto teor de sólidos da amostra, um volume de 20 ml de licor misto foi filtrado por uma membrana de fibra de vidro com abertura de  $45 \mu m$ . A bancada experimental é mostrada na figura 06.

$$SST(mg.L^{-1}) = p_1(mg) - p_0(mg)/V(L) \quad (4)$$

$$SSV(mg.L^{-1}) = p_1(mg) - p_2(mg)/V(L) \quad (5)$$

$$SSF(mg.L^{-1}) = ST - SV \quad (6)$$

Onde:

$p_0$  = peso da membrana;

$p_1$  = peso da membrana + amostra após 24h na estufa;

$p_2$  = peso da membrana + amostra após 1h na mufla.

Figura 06 – Bancada experimental para serie de sólidos.



Fonte: Autor (2023)

O IVL foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Von Sperling (2016b), usando uma proveta graduada de 1L para sedimentar a amostra de licor misto por 30 minutos. É um parâmetro de controle importante para avaliar a sedimentabilidade da biomassa, e pode indicar possíveis alterações das características morfológicas e biológicas da biomassa floccular.

$$IVL (mL.g^{-1}) = H_{30} \cdot 10^6 / H_0 \cdot SST \quad (7)$$

Onde:

$H_{30}$  = Volume de lodo sedimentado após 30 minutos (mL);

$H_0$  = Volume do licor misto na proveta (mL);

SST = Sólidos suspensos totais (mg.L<sup>-1</sup>).

### 3.2.3 Caracterização do lodo centrifugado

Com o licor misto fresco transferido para tubos falcon, foi realizada a centrifugação a 3000 rpm durante 25 minutos para remover parte da umidade da biomassa. A series de sólidos foi realizada, em triplicata, a fim caracterizar o lodo centrifugado e calcular seu grau de umidade. O procedimento adotado foi o mesmo da sessão 3.2.2, sendo a amostra mensurada em porções de 5 gramas de lodo, pois não foi possível mensurar o volume, em virtude da consistência em pasta do lodo. O lodo centrifugado em forma de pellet é mostrado na figura 07.

$$ST(mg.g^{-1}) = p1(mg) - p0(mg)/P(g) \quad (8)$$

$$SV(mg.g^{-1}) = p1(mg) - p2(mg)/P(g) \quad (9)$$

$$SF(mg.g^{-1}) = p1(mg) - p2(mg)/P(g) \quad (10)$$

Onde:

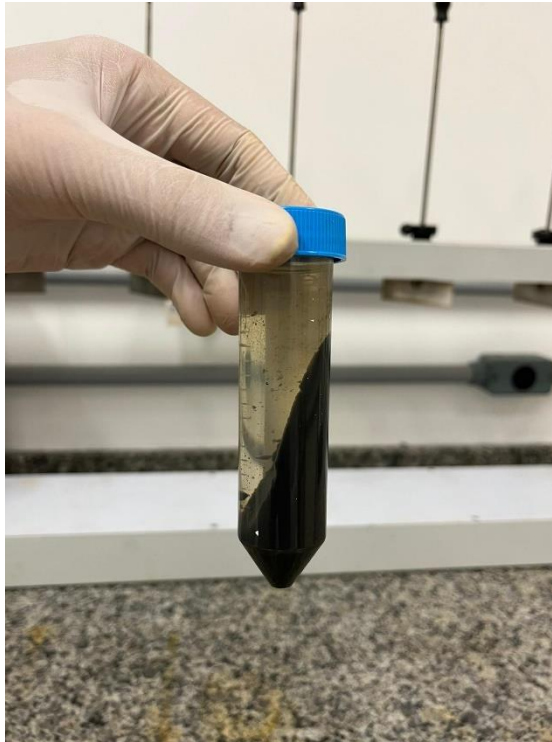
$p0$  = peso do cadinho;

$p1$  = peso do cadinho + amostra após 24h na estufa;

$p2$  = peso do cadinho + amostra após 1h na mufla.



Figura 07 – Lodo centrifugado em tubo falcon.



Fonte: Autor (2023)

Também foi determinado o teor de sólidos secos e a massa específica ( $\gamma$ ) do licor misto e do lodo centrifugado, de acordo com as seguintes equações propostas por Von Sperling (2014):

$$Umidade (\%) = \frac{Peso amostra (g) - ST (g)}{Peso da amostra (g)} \quad (11)$$

$$Sólidos Secos (\%) = 1 - Umidade \quad (12)$$

$$Densidade de Sólidos = \frac{1}{\frac{SF/ST}{2,5} + \frac{SV/ST}{1,0}} \quad (13)$$

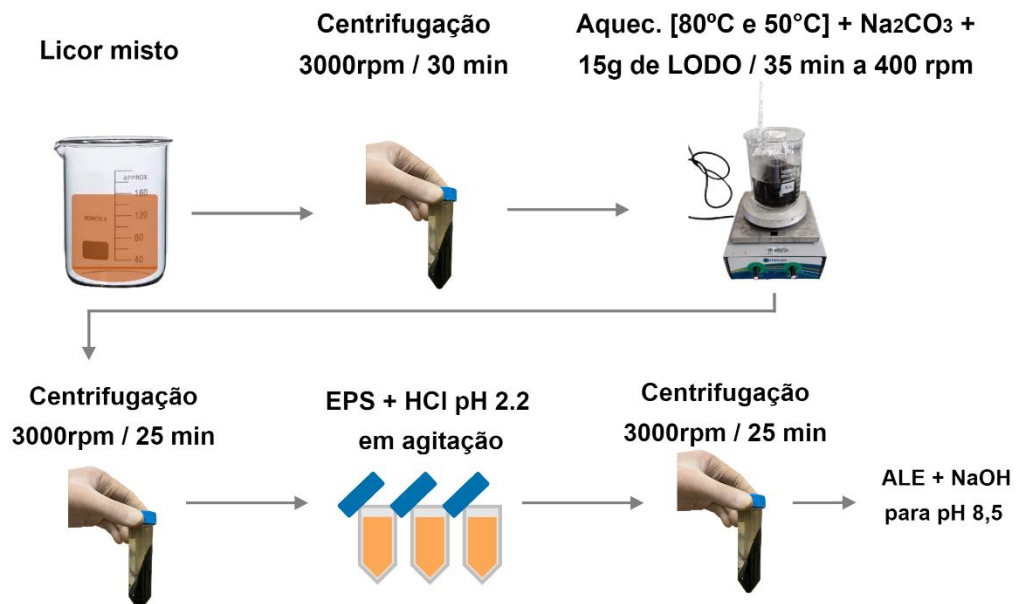
$$\gamma (g.L^{-1}) = \frac{1}{\frac{Fração Sólida no Lodo}{Densidade de Sólidos} + \frac{Fração de água no lodo}{1,0}} \quad (14)$$

### 3.3 RECUPERAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS DO LODO

#### 3.3.1 Extração de EPS

O processo de extração de EPS do lodo aeróbio foi realizado de acordo com a metodologia adaptada de Felz et al. (2016) e é esquematizada na figura 08. O lodo é solubilizado em condições alcalinas, alta temperatura e agitação mecânica. Para a extração, 15g de biomassa previamente centrifugada foi adicionada à 250 mL de água deionizada, aquecida à 80°C e acrescida de 1,25g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  sob agitação durante 35 minutos utilizando agitador magnético com rotação à 400 rpm. O material proveniente do processo de extração do EPS foi transferido para tubos Falcon e levado a centrífuga por 25 minutos a 3000 rpm. Após a centrifugação, o EPS é coletado como sobrenadante. Com o objetivo de avaliar a influência da temperatura no rendimento de EPS e seus componentes, o procedimento de extração foi duplicado variando apenas a temperatura para 50 °C. A extração de ALE foi realizada com o objetivo de realizar o teste de reticulação e verificar a capacidade de formação de hidrogel iônico. O EPS solubilizado e o ALE na forma ácida são mostrados na figura 09.

Figura 08 – Fluxograma do processo de extração de EPS.



Fonte: Autor

Figura 09 – EPS Solubilizado (sobrenadante) e ALE na forma ácida (precipitado)



Fonte: Autor (2023)

### 3.3.2 Série de sólidos e rendimento

A determinação da série de sólidos em suspensão do EPS seguiu o procedimento adotado na sessão 3.2.2. O volume de EPS filtrado variou de 20 mL a 30 mL. O rendimento do EPS é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Rendimento (\%)} = [SSV_{eps} (mg.L^{-1}) / SSV_{lodo} (g.L^{-1})] \times 10 \quad (15)$$

### 3.3.3 Concentração de proteínas e ácidos húmicos

A concentração de proteínas foi determinada através do método colorimétrico de Lowry modificado (FROLUND; GRIEBE; NIELSEN, 1995) que permite mensurar a interferência das substâncias húmicas. A análise consiste na elaboração de duas soluções diferenciadas pela adição de sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ). Em um tubo de ensaio, 1 mL da amostra é adicionada juntamente com 5 mL de uma das respectivas soluções, compondo duas séries de

amostras. Após 10 minutos de incubação em temperatura ambiente, 0,5 mL de folin-ciocalteu (1N) é adicionado. A solução é misturada e deixada em repouso a temperatura ambiente e na ausência de luz durante 30 min, até a leitura da absorbância em comprimento onda de 750 nm. As absorbâncias das séries são então usadas para calcular as absorbâncias da fração de proteínas e ácidos húmicos com as seguintes equações:

$$A_{proteína} = 1,25 (A_{total} - A_{tampão}) \quad (16)$$

$$A_{húmico} = A_{tampão} - 0,2(A_{proteína}) \quad (17)$$

Onde:

$A_{total}$  = absorbância medida na amostra contendo reagente com CuSO<sub>4</sub>

$A_{tampão}$  = absorbância medida na amostra contendo reagente sem CuSO<sub>4</sub>

$A_{proteína}$  = Absorbância resultante referente às proteínas

$A_{húmico}$  = Absorbância resultante referente às substâncias húmicas

Após as leituras das absorbâncias referentes às proteínas e substâncias húmicas, os resultados são calculados em termos de mg de BSA (Bovine Serum Albumin) ou mg ácidos húmicos por g de SSV a partir de curvas padrão. As análises foram feitas em triplicata.

A preparação das soluções e as curvas padrões de proteínas e ácidos húmicos estão disponíveis no anexo A.

### 3.3.4 Concentração de ácido glucurônico e glicose

Os polissacarídeos foram determinados utilizando a adaptação do método clássico de antrona desenvolvido por Rondel et al. (2013) permitindo quantificar as parcelas de açúcares neutros e urônicos. As análises foram feitas em triplicatas a partir da mistura de 2 mL de amostra diluída com 4 mL do reagente antrona (0,2g dissolvidos em 100 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98%) em um tubo de ensaio, mantendo sempre a relação 1:2 (v:v) entre amostra e reagente. A homogeneização da mistura foi realizada em um aparelho vórtex, e os tubos colocados cobertos em papel alumínio no banho-maria (100°C) durante 15 min. Após o resfriamento, a leitura das absorbâncias nos dois comprimentos de onda sugeridos, 560 nm e 620 nm, era realizada. A quantificação dos açúcares urônicos e neutros foi determinada pelas equações:

$$Glc = \frac{A_{560} \cdot b_{620} - A_{620} \cdot b_{560}}{a_{560} \cdot b_{620} - a_{620} \cdot b_{560}} \quad (18)$$

$$Gla = \frac{A_{560} \cdot a_{620} - A_{620} \cdot a_{560}}{a_{620} \cdot b_{560} - a_{560} \cdot b_{620}} \quad (19)$$

Onde:

[Glc] = concentração de açúcares neutros expresso em mg de glicose equivalente;

[Gla] = concentração de açúcares urônicos expresso em mg de ácido glucurônico equivalente;

$A_i$  = absorvância da amostra no comprimento de onda  $i$  (560 nm ou 620 nm);

$a_i$  = coeficiente angular da curva de calibração do padrão glicose no comprimento de onda  $i$ ;

$b_i$  = coeficiente angular da curva de calibração do padrão ácido glucurônico no comprimento de onda  $i$ .

As curvas padrões de açúcares neutros e urônicos estão disponíveis no anexo B.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 SÉRIE DE SÓLIDOS, UMIDADE E IVL DO LODO

De acordo com Von Sperling e Gonçalves (2014), o teor de sólidos secos dos sistemas de lodos ativados de aeração prolongada compreende a faixa de 0,8% à 1,2%. De acordo com a tabela 01 para o lodo em estudo, o teor de sólidos secos ficou abaixo do esperado para essa classificação. Apesar de uma concentração menor de sólidos, a relação SS/ST, que mostra o percentual de material orgânico no lodo, se manteve dentro da faixa de 0,65 à 0,75 proposta.

Tabela 01 – Teor de sólidos e umidade do licor misto.

<b>Amostra</b>	<b>ST [mg/L]</b>	<b>SV [mg/L]</b>	<b>SF [mg/L]</b>	<b>SS/ST</b>	<b>Umidade [%]</b>	<b>Sólidos secos [%]</b>
1	4912,00	3390,00	1522,00	0,690	99,51%	0,49%
2	5018,00	3448,00	1570,00	0,687	99,48%	0,52%
Média	4965,00	3419,00	1546,00	0,689	99,49%	0,51%
± Erro padrão	53,00	29,00	24,00	0,002	0,01	0,01

Fonte: Autor (2023)

A massa específica foi determinada com o objetivo de mensurar a capacidade do processo de centrifugação em bancada na remoção da umidade das amostras de licor misto, pois não foi possível realizar a medição direta do volume de lodo centrifugado de forma analítica. Os dados são apresentados na tabela 02:

Tabela 02 – Densidades e massa específica do lodo licor misto.

<b>Amostra</b>	<b>Dens. Sólidos</b>	<b>Dens. Lodo</b>	<b>Mass Espec. [g/L]</b>
1	1,228	1,0009	1000,92
2	1,231	1,0010	1000,98
Média	1,230	1,0010	1000,95
± Erro padrão	0,002	3E <sup>-05</sup>	0,03

Fonte: Autor (2023)

O processo de desaguamento tem capacidade de obter uma pasta de lodo com concentrações de sólidos entre 20% a 40%. A capacidade de capturar sólidos da centrifugação em bancada foi satisfatória, pois a faixa de teor de sólidos de sistemas aeróbios de aeração prolongada capturados por centrifugas e com a adição de polieletrólitos é de 18% à 22%

(GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2014). As porcentagens podem variar de acordo com os fabricantes e a modernidade do sistema de desaguamento, no entanto, são estimativas confiáveis como parâmetros para comparação. A seguir na tabela 03, é possível verificar os dados do teor de sólidos.

Tabela 03 – Teor de sólidos e umidade do lodo centrifugado.

<b>Amostra</b>	<b>ST</b> <b>[mg/g]</b>	<b>SV</b> <b>[mg/g]</b>	<b>SF</b> <b>[mg/g]</b>	<b>Umidade</b> <b>[%]</b>	<b>Sólidos secos</b> <b>[%]</b>
1	149,38	101,62	47,76	85,16%	14,84%
2	119,12	83,2	35,92	88,57%	11,43%
Média	134,25	92,41	41,84	86,86%	13,14%
± Erro padrão	15,13	9,21	5,92	1,71	1,71%

Fonte: Autor (2023)

O IVL não apresentou diferenças significativas entre as amostras de licor misto, conforme a tabela 04. Von Sperling (2016b), relata que o teste sofre limitações pois permite que lodos com baixa capacidade de sedimentação possuam IVL distintos. Como as concentrações de sólidos totais são próximas, é possível afirmar que o lodo apresentou uma capacidade ruim de sedimentação (IVL 200 mL.g<sup>-1</sup> a 300 mL.g<sup>-1</sup>), podendo ocasionar problemas operacionais como o arraste de sólidos no decantador secundário. O arraste de sólidos caracterizado por IVL alto possui origem biológica e, o crescimento disperso de bactérias, excesso de EPS e crescimento excessivo de bactérias filamentosas nos flocos, são os principais indicadores (FÁVARO, 2022).

Tabela 04 – Série de sólidos em suspensão e IVL.

<b>Amostra</b>	<b>SST</b> <b>[mg/L]</b>	<b>SSV</b> <b>[mg/L]</b>	<b>SSF</b> <b>[mg/L]</b>	<b>H30</b> <b>[mL]</b>	<b>H0</b> <b>[mL]</b>	<b>IVL</b> <b>[mL/g]</b>
1	4116,67	3010,00	1106,67	980,00	1000,00	238,05
2	4175,00	2910,00	1265,00	990,00	1000,00	237,12
Média	4145,84	2960,00	1185,84			
± Erro padrão	29,17	50,00	79,16			

Fonte: Autor (2023)

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO EPS

### 4.2.1 Teor de sólidos e rendimento

O teor de sólidos do EPS referente as estratégias são apresentados na tabela 05 e gráfico 10 a seguir. A escolha da temperatura de 50°C teve como motivação a otimização energética do processo visando as oportunidades de recuperação de biopolímeros em escala real. Como as metodologias de solubilização de EPS em condições alcalinas e aquecimento a 80°C é amplamente usada em estudos para extração de EPS, como Felz et al. (2016) e Lin et al. (2010), a temperatura de 50°C foi selecionada, assim feito também por Cydzik-Kwiatkowska et al. (2022).

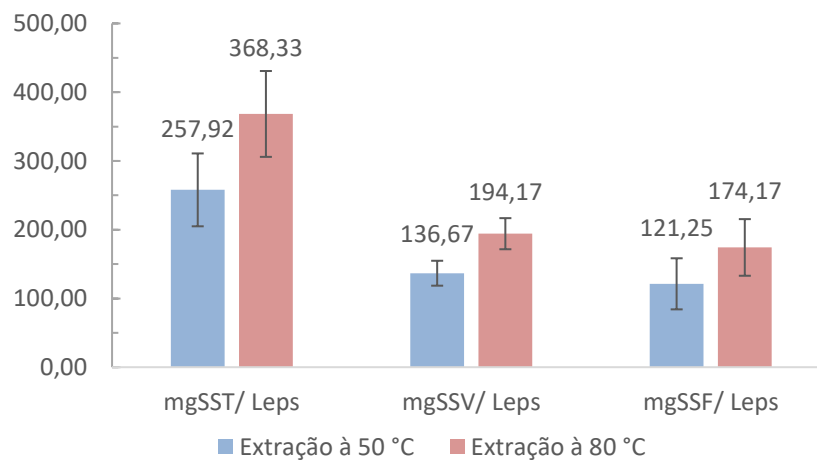
Tabela 5 – Teor de sólidos do EPS (\*N=4).

	Extração à 50°C	Extração à 80°C
<b>SST [mg/L]</b>	354,00 ± 52,99	368,33 ± 62,43
<b>SSV [mg/L]</b>	136,64 ± 18,10	194,17 ± 22,62
<b>SSF [mg/L]</b>	121,25 ± 37,16	174,17 ± 41,17

\*N: número de amostras

Fonte: Autor (2023)

Figura 10 – Comparação dos teores de sólidos do EPS entre as diferentes estratégias.

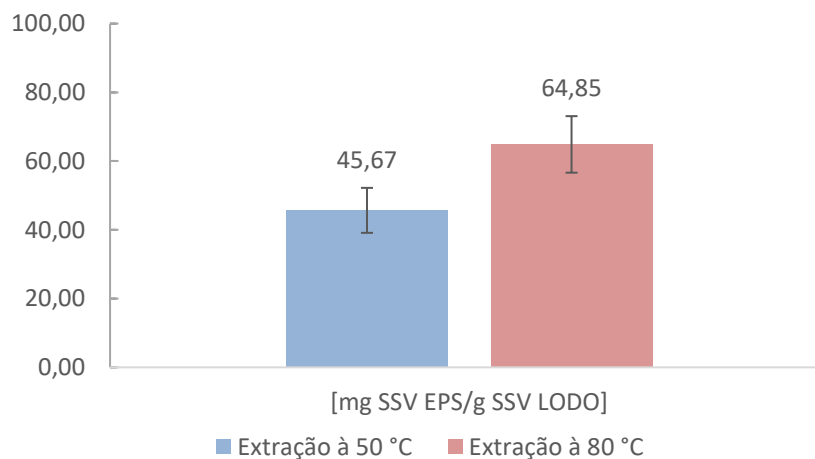


Fonte: Autor (2023)



As maiores frações de sólidos pertencem ao processo de extração com a aquecimento à 80°C. Além das condições alcalinas, a agitação da mistura com aquecimento favorece a solubilização do EPS, como o observado e descrito por Felz et. (2016), avaliando diferentes métodos de extração. O rendimento de EPS também foi maior na extração a 80°C, conforme a figura 11:

Figura 11 – Comparação entre o rendimento de EPS entre as diferentes estratégias.



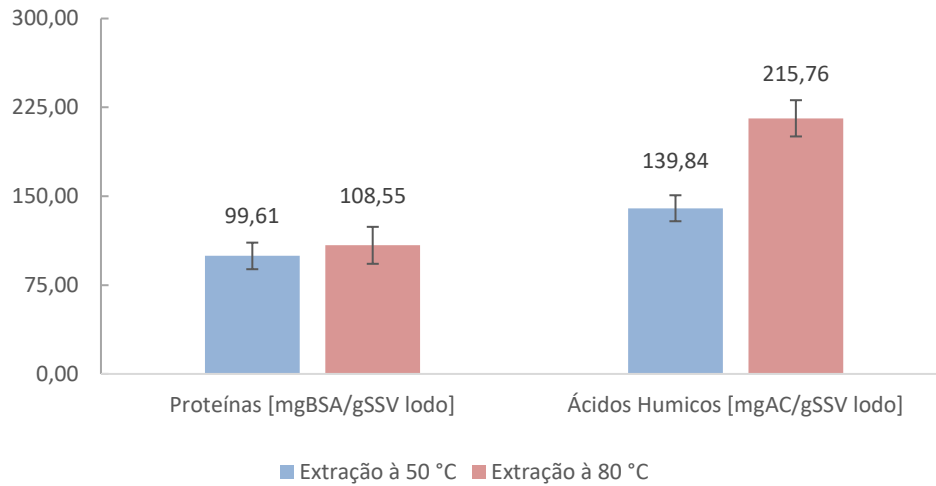
Fonte: Autor (2023)

Em termos percentuais, o rendimento das extrações de EPS à 50°C e 80°C foram de 4,57% e 6,48%, respectivamente. O baixo rendimento em relação ao obtido por Hong et al. (2017) (421 mgEPS/g ssv<sub>lodo</sub>) e outros trabalhos referentes ao EPS de lodo ativado flocular como o de Li et al. (2021), é justificado pelo teor sólidos do EPS ter sido determinado a partir da fração suspensa quando este encontrava-se solubilizado (GOMMERSBACH, 2022). Felz et al. (2016), obteve rendimento de 46% após sucessivas extrações do sedimento da etapa de solubilização. O sedimento é mostrado na figura 9, à direita.

#### 4.2.2 Concentração de proteínas (PN) e polissacarídeos (PS) e ácidos húmicos

A concentração de proteínas das duas estratégias apresentou uma diferença percentual ( $\pm 8\%$ ) e ácidos húmicos de ( $\pm 54\%$ ). As concentrações de proteínas e ácidos húmicos (figura 12) foram maiores na extração à 80°C,

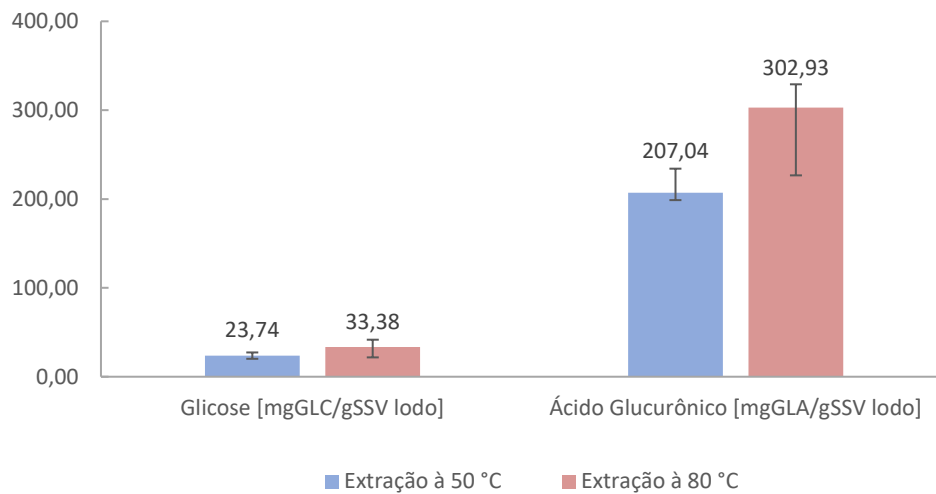
Figura 12 – Concentração de proteínas e ácidos húmicos no EPS.



Fonte: Autor (2023)

A concentração de glicose entre as duas estratégias apresentou uma diferença percentual ( $\pm 40\%$ ) e ácidos urônicos de ( $\pm 46\%$ ). As concentrações de glicose e ácidos urônicos (figura 13) foram substancialmente maiores na extração à 80°C. Os polissacarídeos formados a partir dos ácidos urônicos são os componentes mais abundantes no EPS extraído. Os polissacarídeos ocupam a parte mais externa da biomassa granular (ADAV; LEE, 2008). Na presença de cátions divalentes como agentes iônicos reticulantes, os monômeros de ácido glucurônico se rearranjam formando a estrutura e hidrogel (LEE; MOONEY, 2012).

Figura 13 – Concentração de polissacarídeos no EPS.



Fonte: Autor (2023)

Na biomassa granular aeróbia, os componentes mais abundantes do EPS são os polissacarídeos e proteínas, com uma razão PN/PS maior que um em grande parte dos estudos (FENG et al., 2021). Analisando o rendimento de EPS e a composição do biopolímero ALE de várias de estações de tratamento de lodos ativados na china, Li et al. (2021) obtiveram como resultado razões PN/PS variando de 2,0 à 4,5. As proteínas conferem a biomassa maior capacidade de formação e estabilidade (MCSWAIN et al., 2005). Costa (2021), operando um RBSG em escala piloto e alimentado com esgoto doméstico sob diferentes condições operacionais obteve concentrações maiores de proteínas. Schambeck et al. (2020) obteve maiores concentrações de proteínas de flocos de lodos ativados tratando esgoto doméstico (PN  $137 \pm 28$  mg/g  $s_{Vlodo}$ , PS  $18 \pm 3$  mg<sub>glic</sub>/g  $s_{Vlodo}$  e  $48 \pm 13$  mg ácido glucurônico /g  $s_{Vlodo}$ ). Hong et al. (2017) utilizado o método semelhante de extração, em condições alcalinas (NaOH) e aquecimento, obteve também maiores concentrações de proteínas no EPS de flocos tratando efluente doméstico (PN 186 mg/g  $s_{SVlodo}$ , PS 46 mg/g  $s_{SVlodo}$  e subs húmicas 56 mg/g  $s_{SVlodo}$ ). Uma hipótese aceitável para justificar a maior concentração de polissacarídeo no EPS do lodo flocular em estudo seria a alta razão C/N do substrato, favorecendo a formação de polissacarídeos extracelulares pela comunidade microbiana (CHEN et al., 2022). A alta concentração de ácidos orgânicos voláteis também pode contribuir para a maior formação de PS, conferindo-os maior elasticidade como géis (CHEN et al., 2022; SCHAMBECK et al., 2020). O afluente recebido pelo sistema aeróbio é originado de reator UASB, e os ácidos

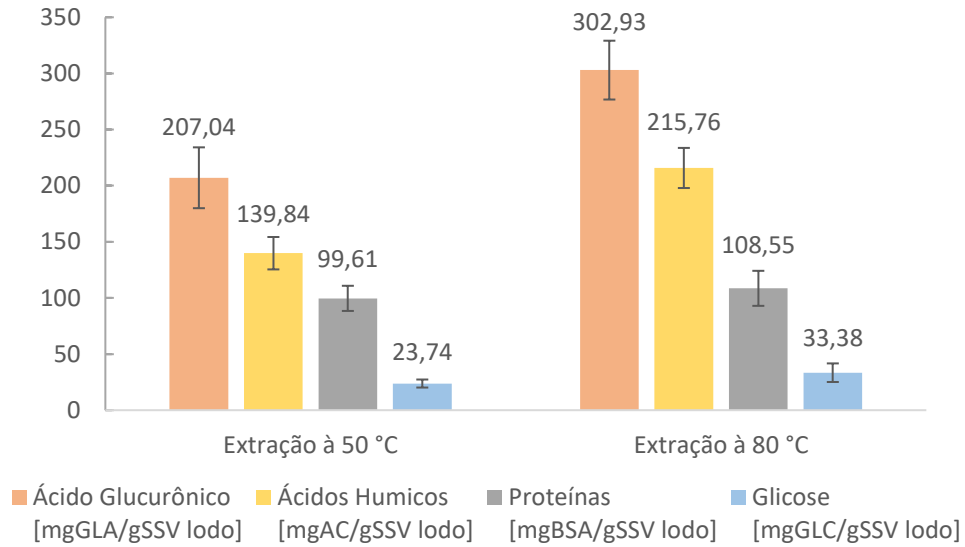
orgânicos voláteis como produtos da acidogênese podem ser abundantes, favorecendo a condição de maior produção de polissacarídeos.

As substâncias húmicas apresentam-se como o segundo componente mais abundante no EPS, assim como Schambeck et al. (2020), que encontrou  $181 \pm 18$  mg/sv lodo e 80 mg/sv lodo, em biomassa granular e flocular respectivamente. Os ácidos húmicos são abundantes em ambientes aquáticos e se originam dos processos de humificação de substâncias orgânicas, sendo também muito resistentes a biodegradação completa. (FLEMMING; WINGENDER, 2010). Muito presentes nos solos, as substâncias húmicas são produzidas por vias catabólicas de bactérias e possuem uma coloração majoritariamente escura (MARTELLI, 2011). Em meio alcalino a fração de ácidos húmicos é mais solúvel, precipitando após acidificação (STEVENSON, 1994).

Muitos estudos demonstram que a quantidade e composição do EPS recuperado de biomassa variam de acordo com a metodologia de extração adotada, qualidade do afluente, substrato, temperatura, tempo de retenção do sólido (LI et al., 2021; SCHAMBECK, 2018), fazendo com que a elaboração de teorias genéricas acerca das quantidades e composição dos biopolímeros de biomassa seja dificultada.

Em termos gerais, a extração à 80 °C solubilizou melhor o EPS e o favoreceu o maior rendimento de polissacarídeos, proteínas e ácidos húmicos (figura 14). A comparação da composição e quantidade dos componentes de EPS entre biomassa flocular e granular é válida, uma vez que são similares, e diferenças qualitativas relevantes ainda não foram observadas (SAM; DULEKGURGEN, 2016; SCHAMBECK et al., 2020).

Figura 14 – Componentes quantificados do EPS



Fonte: Autor (2023)

Tabela 6 – Dados numéricos das concentrações dos componentes do EPS (\*N=4).

	<b>Glicose</b> [mgGLC/gSSV lodo]	<b>Ác. Glucurônico</b> [mgGLA/gSSV lodo]	<b>Proteínas</b> [mgBSA/gSSV lodo]	<b>Ácidos Humicos</b> [mgAC/gSSV lodo]
Ex. 50°C	23,74 ± 3,57	207,04 ± 27,1	99,61 ± 11,2	139,84 ± 14,43
Ex. 80°C	33,38 ± 8,28	302,93 ± 26,2	108,55 ± 15,6	215,76 ± 17,87

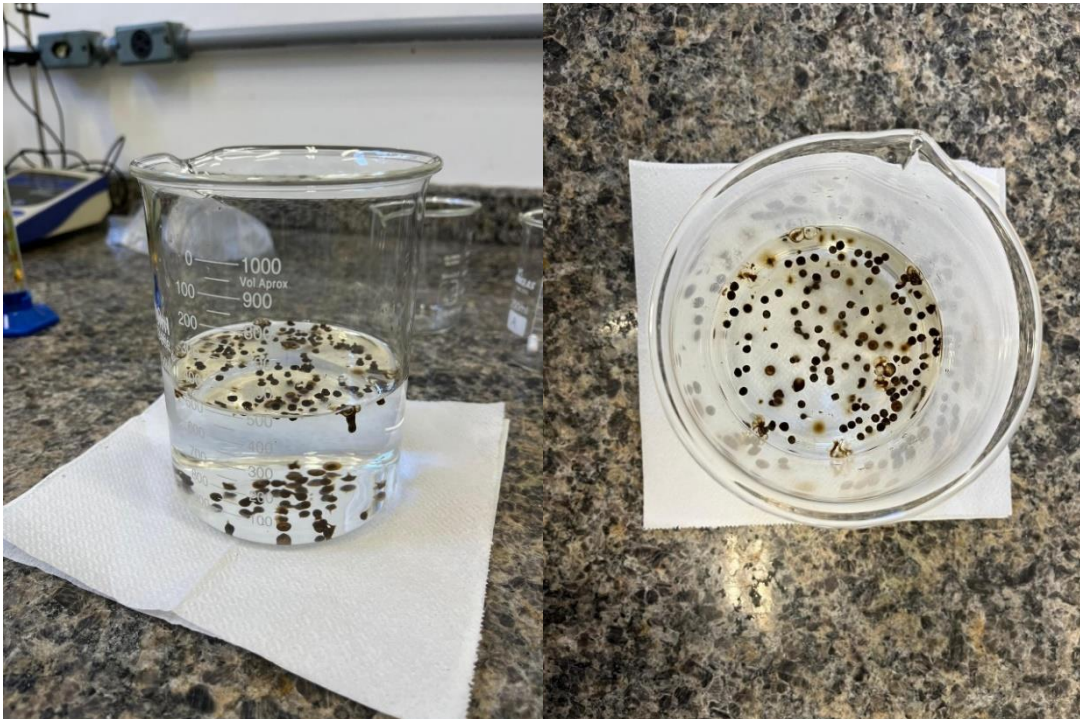
\*N: número de amostras

Fonte: Autor (2023)

#### 4.2.3 Teste de reticulação

A capacidade de formar hidrogel na presença de íons catiônicos do ALE foi comprovada, através da formação de esferas quando lançado em solução de cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>) (LIN et al., 2010). No ALE obtido na extração a 50°C, as esferas formadas foram irregulares e maiores em comparação com as esferas obtidas na extração a 80°C, que apresentaram mais regularidade e densidade. A concentração de polissacarídeos pode explicar a diferença na característica do hidrogel formado, pois acredita-se que os polímeros formados pelos blocos de ácidos glucurônico sejam responsáveis pela força e rigidez do hidrogel (HAY et al., 2023)

Figura 15 – Teste de reticulação do ALE de EPS (80°C).



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 – Teste de reticulação do ALE de EPS (50°C).



Fonte: Autor (2023)

## 5 CONCLUSÕES

Apesar dos avanços nos estudos de EPS de biomassa granular serem mais notáveis, há interesse em estudar esses biopolímeros no contexto da biomassa flocular, em função da popularidade e difusão desse sistema como alternativa de processo para tratamento de efluentes pelo mundo.

A solubilização do EPS a temperatura de 50°C afetou consideravelmente o rendimento dos componentes do EPS, no entanto, a distribuição se manteve igual. As características do EPS do lodo em estudo podem sofrer variações referente ao gerenciamento de vazões de efluente anaeróbio e bruto; variações sazonais de carga e vazão, o bairro é um ponto turístico internacionalmente conhecido; alteração na vazão de recirculação de lodo aeróbio para digestão; aplicação de polímeros para precipitação fosforo.

Os benefícios da recuperação de EPS do lodo em estudo para a planta da ETE Lagoa da Conceição são: (1) diminuição da sobrecarga de sólidos no reator UASB e otimização da atividade metanogênica; (2) redução do volume de lodo a ser disposto; (3) aplicação de EPS como fertilizante, já que é rico em substâncias húmicas também presentes em solos férteis e, facilmente assimilável pois está solúvel, ao contrário de lodo desaguado usado como fertilizante; (4) Aplicação de EPS como biofloculante juntamente com um agente iônico reticulante.

É conclusivo que o lodo residual aeróbio possui EPS, e pode ser extraído e recuperado. A estação tem potencial para se tornar uma unidade de recuperação de recursos. Estudos complementares deverão ser realizados, principalmente para avaliar os efeitos do PAC e demais poluentes recalcitrantes na aplicabilidade dos biopolímeros.

## 6 REFERENCIAS

ADAV, Sunil S.; LEE, Duu-Jong. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 154, n. 1–3, p. 1120–1126, 2008. ISSN: 03043894. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.058.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos: Despolição de bacias hidrográficas**, 2017. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ALGAS BRASIL. **Algas Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.algasbrasil.com.br/>. Acesso em: 5 jul. 2023.

ALVES, Jéssica Ysabelly Torres. Avaliação de sistema de lodo ativado híbrido empregado no póstratamento de reator UASB em região de clima quente. **Dissertação de Mestrado**, Brasil, 2019.

AMIN VIEIRA, Da Costa Nathan Pacheco; LIBARDI, Nelson; RIBEIRO DA COSTA, Rejane Helena. How can the addition of extracellular polymeric substances (EPS)-based bioflocculant affect aerobic granular sludge (AGS)? **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 310, p. 114807, 2022. ISSN: 03014797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114807. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479722003802>.

ANDREOLI, Cleverson V; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodos de Esgotos: Tratamento e disposição final**. 2. ed., Minas Gerais: UFMG, 2014. 444 p.

APHA. 2540 SOLIDS. *Em: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. [s.l.] : American Public Health Association, 2017. . (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater). DOI: doi:10.2105/SMWW.2882.030. Disponível em: <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.030>.

BENTO, Alessandra Pellizzaro; SEZERINO, Pablo Heleno; PHILIPPI, Luiz Sergio; REGINATTO, Valeria; LAPOLLI, Flavio Rubens. Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 329–338, 2005. ISSN: 1413-4152. DOI: 10.1590/S1413-41522005000400009.

BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário oficial da união** 2010; 3 ago.



BUNTNER, D.; SPANJERS, H.; VAN LIER, J. B. The influence of hydrolysis induced biopolymers from recycled aerobic sludge on specific methanogenic activity and sludge filterability in an anaerobic membrane bioreactor. **Water Research**, [S. l.], v. 51, p. 284–292, 2014. ISSN: 00431354. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.065.

CAVALCANTI, José Eduardo W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. São Paulo.

CHEN, Xingyu; LEE, Yu-Jen; YUAN, Tian; LEI, Zhongfang; ADACHI, Yasuhisa; ZHANG, Zhenya; LIN, Yuemei; VAN LOOSDRECHT, Mark C. M. A review on recovery of extracellular biopolymers from flocculent and granular activated sludges: Cognition, key influencing factors, applications, and challenges. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 363, p. 127854, 2022. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127854. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852422011841>.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed., Belo Horizonte: Editora ufmg, 2007. 246 p.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos; RIBEIRO, Thiago Bressani; GARCIA, Guilherme Brugger; LERMONTOV, André; PLATZER, Christoph Julius; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere; ROSSETO, Mário Augusto Loureiro Leites Renato. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, [S. l.], v. 66, n. 213, p. 5–19, 2018. ISSN: 0101-6040. DOI: 10.4322/dae.2018.028.

CORNELLI, Renata; AMARAL, Fernando Gonçalves; DANILEVICZ, Ângela de Moura Ferreira; GUIMARÃES, Lia Buarque de Macedo. Métodos De Tratamento De Esgotos Domésticos: Uma Revisão Sistemática. **REA –Revista de estudos ambientais**, Porto Alegre, p. 20–36, 2014.

COSTA, Nathan Pacheco Amin Viera Da. Aplicação De Alginato De Sódio E Substâncias Poliméricas Extracelulares Para Redução Do Tempo De Granulação E Estabilidade Da Biomassa Em Reator Em Bateladas Sequenciais. **Universidade Federal de Santa Catarina**, [S. l.], p. 102, 2021.

CYDZIK-KWIATKOWSKA, Agnieszka; GUSIATIN, Mariusz Z.; ZIELIŃSKA, Magdalena; WOJNOWSKA-BARYŁA, Irena; KULIKOWSKA, Dorota; BERNAT, Katarzyna. Alginate-like polymers from full-scale aerobic granular sludge: content, recovery, characterization, and

application for cadmium adsorption. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 22260, 2022. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-022-26743-5. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-26743-5>.

FÁVARO, Ana Luiza. **Entenda por que acontece o arraste de sólidos em sistemas de Lodos Ativado**s. 2022. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/entenda-por-que-acontece-o-arraste-de-s%C3%B3lidos-em-sistemas-f%C3%A1varo/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 8 jul. 2023.

FELZ, Simon; AL-ZUHAIRY, Salah; AARSTAD, Olav Andreas; VAN LOOSDRECHT, Mark C. M.; LIN, Yue Mei. Extraction of Structural Extracellular Polymeric Substances from Aerobic Granular Sludge. **Journal of Visualized Experiments**, [S. l.], 2016. ISSN: 1940-087X. DOI: 10.3791/54534. Disponível em: <http://www.jove.com/video/54534/extraction-structural-extracellular-polymeric-substances-from-aerobic>.

FENG, Cuijie; LOTTI, Tommaso; CANZIANI, Roberto; LIN, Yuemei; TAGLIABUE, Camilla; MALPEI, Francesca. Extracellular biopolymers recovered as raw biomaterials from waste granular sludge and potential applications: A critical review. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 753, p. 142051, 2021. ISSN: 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142051.

FLEMMING, Hans-Curt; WINGENDER, Jost. The biofilm matrix. **Nature Reviews Microbiology**, [S. l.], v. 8, n. 9, p. 623–633, 2010. ISSN: 1740-1526. DOI: 10.1038/nrmicro2415.

FR/OLUND, B.; GRIEBE, T.; NIELSEN, P. H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [S. l.], v. 43, n. 4, p. 755–761, 1995. ISSN: 0175-7598. DOI: 10.1007/BF00164784.

GOMMERSBACH, Carolina. Produção e aplicação de biofloculantes a partir de lodo residual de processos biológicos de tratamento de efluentes. **Universidade Federal de Santa Catarina**, [S. l.], p. 47, 2022.

GONÇALVES, Ricardo Franci; LUDUVICE, Mauricio; VON SPERLING, Marcos. Remoção de umidade de lodo de esgotos. *Em: Lodos de esgoto: Tratamento e disposição final*. 2. ed., Belo Horizonte: Editora ufmg, 2014. v. 6.

Hay, I. D., Rehman, Z. U., Moradali, M. F., Wang, Y., & Rehm, B. H. (2013). Microbial alginate production, modification and its applications. **Microbial biotechnology**, 6(6), 637-650.

HONG, Phuc-Nguon; HONDA, Ryo; NOGUCHI, Mana; ITO, Tomohiro. Optimum selection of extraction methods of extracellular polymeric substances in activated sludge for effective extraction of the target components. **Biochemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 127, p. 136–146, 2017. ISSN: 1369703X. DOI: 10.1016/j.bej.2017.08.002.

KAUMERA. **Kaumera**. 2022. Disponível em: <https://kaumera.com/english/kaumera>. Acesso em: 5 jul. 2023.

LARA, Aderlene Ines De; ANDREOLI, Cleverson V; PEGORINI, Eduardo Sabino. Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo. *Em*: ANDREOLI, Cleverson V; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando (org.). **Lodos de esgoto: Tratamento e disposição final**. 2. ed., Belo Horizonte: Editora ufmg, 2014. v. 6. .

LEE, Erich Shen Higa. Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ete) e estudo sobre seu potencial energético. *Em*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL 2011, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: Ibeas, 2011

LEE, Kuen Yong; MOONEY, David J. Alginate: Properties and biomedical applications. **Progress in Polymer Science**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 106–126, 2012. ISSN: 00796700. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003.

LENS, P.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation. **Water Intelligence Online**, [S. l.], v. 4, n. 0, 2015. ISSN: 1476-1777. DOI: 10.2166/9781780402949.

LI, Ji; HAO, Xiaodi; GAN, Wei; VAN LOOSDRECHT, Mark C. M.; WU, Yuanyuan. Recovery of extracellular biopolymers from conventional activated sludge: Potential, characteristics and limitation. **Water Research**, [S. l.], v. 205, p. 117706, 2021. ISSN: 00431354. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117706. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135421009003>.

LIN, Yuemei; DE KREUK, Merle; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; ADIN, Avner. Characterization of alginate-like exopolysaccharides isolated from aerobic granular sludge in pilot-plant. **Water Research**, [S. l.], v. 44, n. 11, p. 3355–3364, 2010. ISSN: 00431354. DOI:

10.1016/j.watres.2010.03.019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135410001922>.

LUDUVICE, Mauricio. Processos de estabilização de lodos. *Em*: ANDREOLI, Cleverson V; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando (org.). **Lodos de esgoto: Tratamento e disposição final**. 2. ed., Belo Horizonte: Editora ufmg, 2014. v. 6. .

MAPA. **Estatísticas do setor** . 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor#>. Acesso em: 5 jul. 2023.

MARTELLI, Lilian Fernanda de Almeida. Avaliação quantitativa e qualitativa da matéria orgânica de solo sob a aplicação de efluente de esgoto tratado em biodigestor anaeróbio. **Universidade de São Paulo, [S. l.]**, 2011.

MCSWAIN, B. S.; IRVINE, R. L.; HAUSNER, M.; WILDERER, P. A. Composition and Distribution of Extracellular Polymeric Substances in Aerobic Flocs and Granular Sludge. **Applied and Environmental Microbiology, [S. l.]**, v. 71, n. 2, p. 1051–1057, 2005. ISSN: 0099-2240. DOI: 10.1128/AEM.71.2.1051-1057.2005.

METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed., Porto Alegre: Amgh editora ltda, 2016. 2012 p.

MIKI, Marcelo Kenji. Dilemas do UASB. **Revista DAE, [S. l.]**, v. 58, n. 183, p. 1–37, 2010. ISSN: 0101-6040. DOI: 10.4322/dae.2014.052.

MIKI, Marcelo Kenji.; CHEN, Guang-Hao.; VAN LOOSDRECHT, Mark C. M.; EKAMA, G. A.; BRDJANOVIC, Damir. **Tratamento Biológico de Esgoto**. 2. ed., [s.l.] : IWA Publishing, 2022. ISBN: 9781789063233.

MÜLLER, José Miguel; SANTOS, Renata Lopes Dos; BRIGIDO, Riveli Vieira. Produção de alginato por microrganismos. **Polímeros, [S. l.]**, v. 21, n. 4, p. 305–310, 2011. ISSN: 1678-5169. DOI: 10.1590/S0104-14282011005000051. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282011000400011&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282011000400011&lng=pt&tlng=pt).

OLIVEIRA, Débora Carvalho da Silva; AZEVEDO, Paulo Gabriel Ferreira De; CAVALCANTI, Luiz Antônio Pimentel. Processos biológicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, [S. l.]**, v. 8, n. 18, p. 397–415, 2021. ISSN: 2359-1412. DOI: 10.21438/rbgas(2021)081826.

PEDROZA, Marcelo Mendes; VIEIRA, Glauca Eliza Gama; SOUSA, João Fernandes; PICKLER, Arilza de Castilho; LEAL, Edina Ruth Mendes; MILHOMEN, Cleide da Cruz. Produção e tratamento de lodo de esgoto—uma revisão. **Revista Liberato**, [S. l.], 2010. ISSN: 1518-8043.

RONDEL, Caroline; MARCATO-ROMAIN, Claire-Emmanuelle; GIRBAL-NEUHAUSER, Elisabeth. Development and validation of a colorimetric assay for simultaneous quantification of neutral and uronic sugars. **Water Research**, [S. l.], v. 47, n. 8, p. 2901–2908, 2013. ISSN: 00431354. DOI: 10.1016/j.watres.2013.03.010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135413001693>.

SAM, Stanley Bortse; DULEKGURGEN, Ebru. Characterization of exopolysaccharides from floccular and aerobic granular activated sludge as alginate-like-exoPS. **Desalination and Water Treatment**, [S. l.], v. 57, n. 6, p. 2534–2545, 2016. ISSN: 1944-3994. DOI: 10.1080/19443994.2015.1052567.

SANT'ANNA JR, Geraldo Lippel. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 16, p. IV–IV, 2011. ISSN: 1413-4152.

SCHAMBECK, Cássio Moraes. Recuperação de biopolímeros produzidos no tratamento de esgoto doméstico com lodo aeróbio granular. **Universidade Federal de Santa Catarina**, [S. l.], 2018.

SCHAMBECK, Cássio Moraes; GIRBAL-NEUHAUSER, Elisabeth; BÖNI, Lukas; FISCHER, Peter; BESSIÈRE, Yolaine; PAUL, Etienne; DA COSTA, Rejane Helena Ribeiro; DERLON, Nicolas. Chemical and physical properties of alginate-like exopolymers of aerobic granules and flocs produced from different wastewaters. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 312, p. 123632, 2020. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123632. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420309044>.

SEVIOUR, Thomas et al. Extracellular polymeric substances of biofilms: Suffering from an identity crisis. **Water Research**, [S. l.], v. 151, p. 1–7, 2019. ISSN: 00431354. DOI: 10.1016/j.watres.2018.11.020.

SHENG, Guo-Ping; YU, Han-Qing. Characterization of extracellular polymeric substances of aerobic and anaerobic sludge using three-dimensional excitation and emission matrix

fluorescence spectroscopy. **Water Research**, [S. l.], v. 40, n. 6, p. 1233–1239, 2006. ISSN: 00431354. DOI: 10.1016/j.watres.2006.01.023.

SILVA, Joab Almeida Da; GOMES, Luiz Airton; BENEVENTO, Gian Pietro; SANTOS, Aldecy Almeida. Avaliação do potencial do lodo oriundo de fossas/tanques sépticos domiciliares da região metropolitana de cuiabá (rmc) para disposição final em solo agrícola. *Em: CBESA 2015, Rio de Janeiro. Anais [...].* Rio de Janeiro: ABES, 2015

STEVENSON, Frank J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. [s.l.] : John Wiley & Sons, 1994. ISBN: 0471594741.

SU, Xinying; TIAN, Yu; LI, Hui; WANG, Cuina. New insights into membrane fouling based on characterization of cake sludge and bulk sludge: An especial attention to sludge aggregation. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 128, p. 586–592, 2013. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.11.005.

TAMBURUS, Isabella Esper. Eficiência de remoção de demanda química de oxigênio de efluentes industriais por sistema de lodos ativados e suas variantes: uma revisão sistemática. [S. l.], 2020.

VAN HAANDEL, A. C. Handbook of Biological Wastewater Treatment: Design and Optimisation of Activated Sludge Systems. **Water Intelligence Online**, [S. l.], v. 11, 2012. ISSN: 14761777. DOI: 10.2166/9781780400808.

VENKATA MOHAN, S.; NIKHIL, G. N.; CHIRANJEEVI, P.; NAGENDRANATHA REDDY, C.; ROHIT, M. V.; KUMAR, A. Naresh; SARKAR, Omprakash. Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 215, p. 2–12, 2016. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.130.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed., Minas Gerais: UFMG, 1996. 425 p.

VON SPERLING, Marcos. Lodos ativados. *Em: Lodos ativados*. 4. ed., Belo Horizonte: Editora ufm, 2016 b. v. 4. p. 461.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. 2. ed., Belo Horizonte: Editora ufm, 2016 a. 211 p.

VON SPERLING, Marcos; GONÇALVES, Ricardo Franci. Lodos de esgoto: características e produção. *Em: Lodos de esgoto: Tratamento e disposição final*. 2. ed., Belo Horizonte: Editora ufmg, 2014. v. 6. .

WEBBER, Vanessa. Extração e caracterização de carragenana obtida de *Kappaphycus alvarezii*. **Universidade Federal de Santa Catarina**, [S. l.], 2010.

XIAO, Rui; ZHENG, Yi. Overview of microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their applications. **Biotechnology Advances**, [S. l.], v. 34, n. 7, p. 1225–1244, 2016. ISSN: 07349750. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.08.004.

ZHANG, Xiaoyuan; LIU, Yu. Circular economy is game-changing municipal wastewater treatment technology towards energy and carbon neutrality. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 429, p. 132114, 2022. ISSN: 13858947. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132114. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894721036937>.

## ANEXO A – ESPECTRO PROTEÍNAS

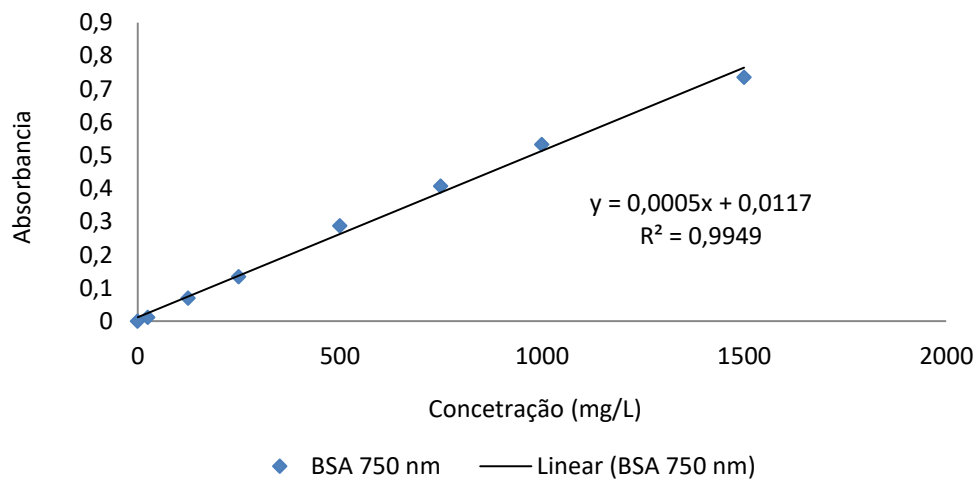
Solução A (100ml):

- 1 mL de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 1% (0,1g em 10 ml de água de análise)
- 1 mL de tartarato de sódio e potássio ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 2% (0,2 g em 10 ml de água de análise)
- 49 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 0,2M (1,599 g em 200 ml de água de análise)
- 49 mL de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 4% (0,8 g em 200 ml de água de análise)

Solução B (100ml)

- 1 mL de tartarato de sódio e potássio ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 2%
- 49 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 0,2M
- 49 mL de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 4%
- 1 mL de água destilada

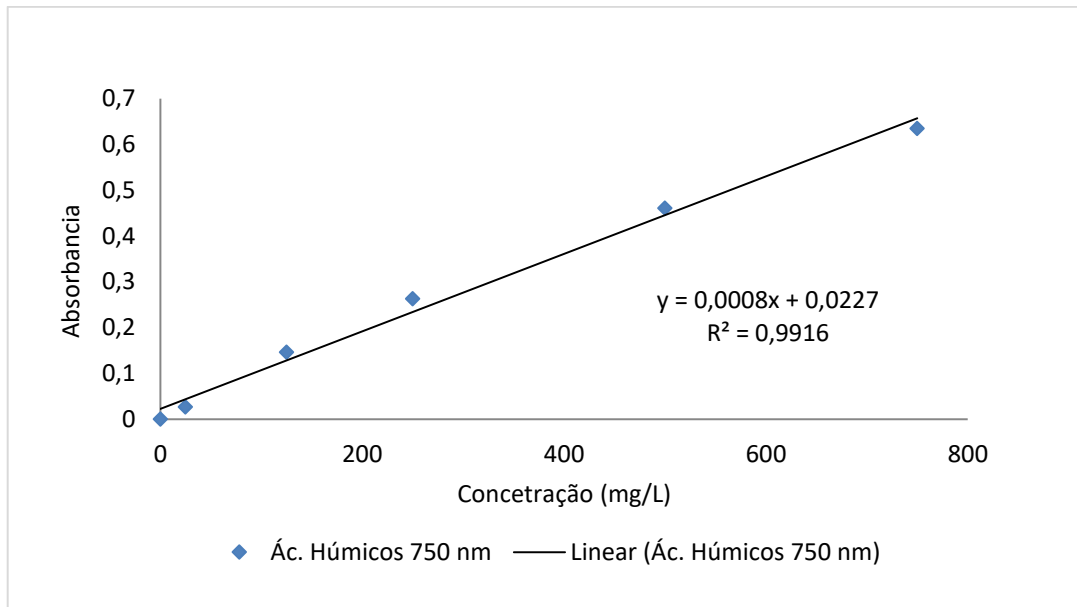
Figura 17 – Curva padrão proteínas.



Fonte: Gommersbach (2022)



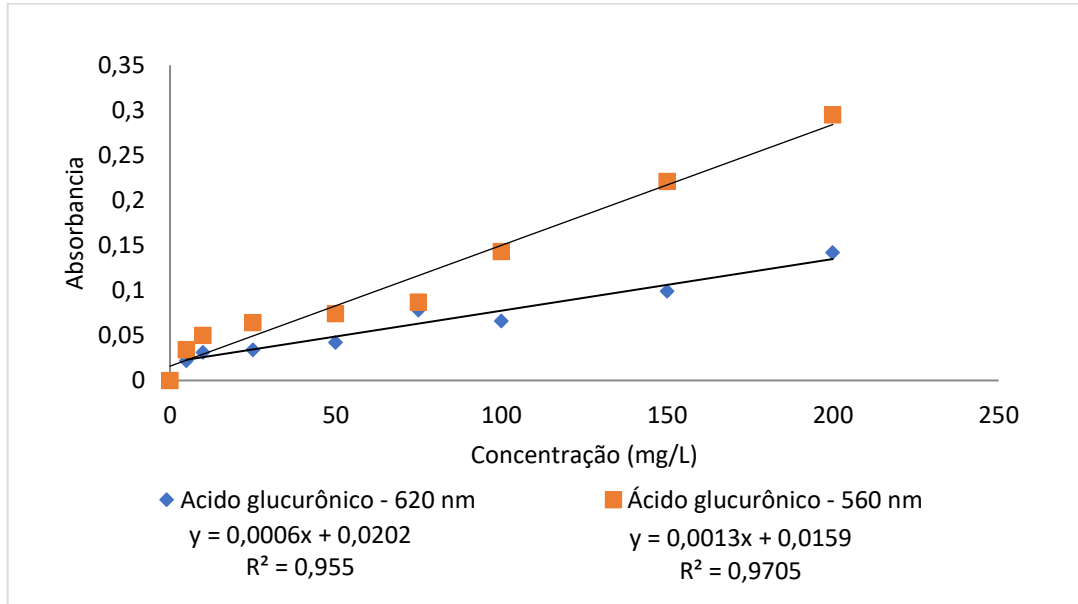
Figura 18 – Curva padrão ácidos húmicos.



Fonte: Gommersbach (2022)

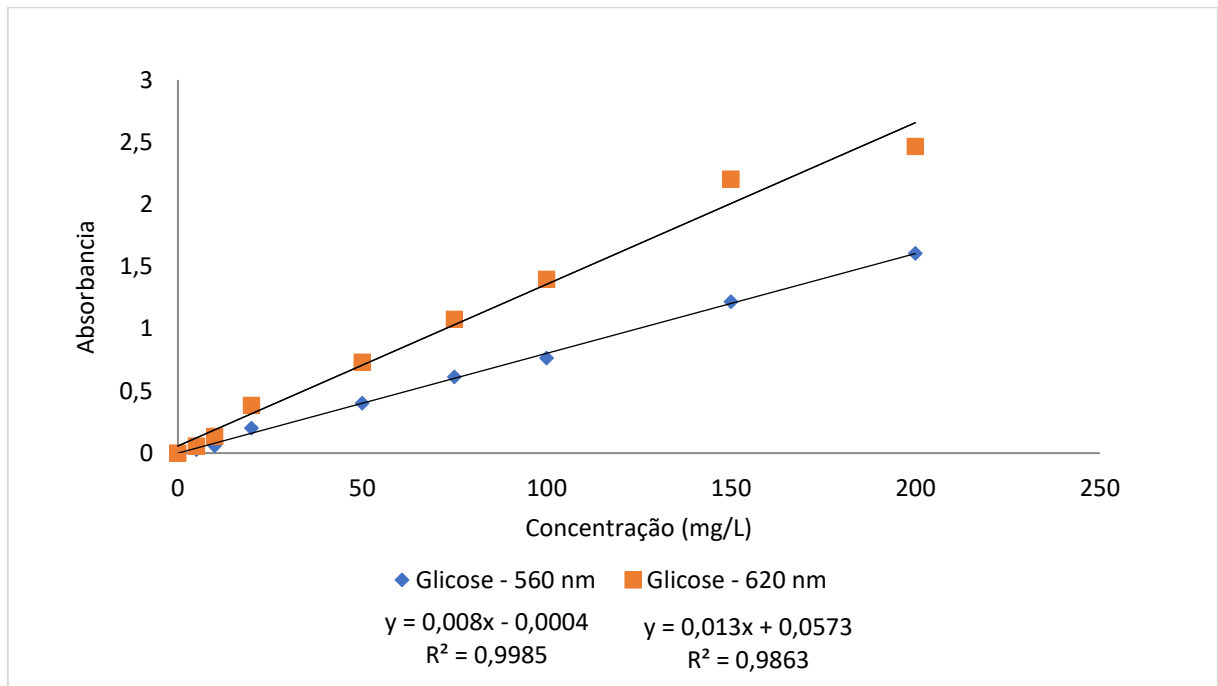
### ANEXO B – ESPECTRO POLISSACARÍDEOS

Figura 19 – Curva padrão ácido glucurônico.



Fonte: Gommersbach (2022)

Figura 20 – Curva padrão glicose.



Fonte: Gommersbach (2022)