

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANOPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Caroline Thie Nakawatase

Alternativas de uso sustentáveis para o efluente final e lodo gerados na ETE Insular-
Florianópolis/SC

Florianópolis

2022

Caroline Thie Nakawatase

Alternativas de uso sustentáveis para o efluente final e lodo gerados na ETE Insular-
Florianópolis/SC

Plano de 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: Prof. Paulo Belli Filho, Dr. Coorientadora: Sandra Regina Alexandre Ramos, Me.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra

Nakawatase, Caroline Thie

Alternativas de uso sustentáveis para o efluente final e lodo gerados na ETE Insular- Florianópolis/SC / Caroline Thie Nakawatase ; orientador, Paulo Belli Filho, coorientador, Sandra Regina Alexandre Ramos, 2022.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. ETE sustentável . 3. Água de reuso. 4. Lodo . I. Belli Filho, Paulo . II. Ramos, Sandra Regina Alexandre . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Caroline Thie Nakawatase

Alternativas de uso sustentáveis para o efluente final e lodo gerados na ETE Insular-
Florianópolis/SC

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

Florianópolis, 15 de março de 2022.



Documento assinado digitalmente

Maria Elisa Magri

Data: 24/03/2022 13:55:27-0300

CPF: 044.011.369-50

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dra. Maria Elisa Magri
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Paulo Belli Filho

Data: 24/03/2022 09:40:27-0300

CPF: 342.690.459-49

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Paulo Belli Filho
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Me. Sandra Regina Alexandre Ramos
Coorientadora
CASAN

Me. Fabiane Andressa Tasca Goerl
Avaliadora
CASAN

Dr. Nelson Libardi Junior
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível.

Aos meus pais, Eliana e Claudio, que por vezes abdicaram de seus desejos pessoais para suprirem as necessidades de seus três filhos, sempre com amor, dedicação e orgulho, fizeram dos meus sonhos os deles e me proporcionaram todo o suporte necessário durante este período. Vocês são meus maiores exemplos.

À minha avó, Tereza, que sempre esteve ao meu lado, participando ativamente da minha educação. Te admiro, vó!

Aos meus amigos Ygor, Juarez, Ana Carolina e Taís que estiveram presentes desde o início da graduação, me apoiando e compreendendo os momentos de ausência, graças a esta amizade sólida que construímos ao longo dos anos, sem cobranças ou julgamos. Vocês são para a vida toda.

Ao meu companheiro Geovan, por toda a paciência, amor, incentivo e suporte durante parte desta jornada, especialmente neste último período. Os “puxões de orelha” foram necessários para alcançar o objetivo final e não desviar do foco. Você é incrível.

Às minhas amigas de trabalho Aparecida, Rhamany, Sandra e Janaína, por todo o apoio durante a graduação, por vezes aceitando trocas de plantão nada vantajosas para suprir minhas necessidades. Vocês são mulheres fortes, incríveis e ótimas profissionais, provando todos os dias que a união faz a força.

Sou grata a Rhamany, Fernanda e Jéssica, amigas que fiz durante a graduação. Obrigada pela ajuda, conselhos e apoio emocional, vocês foram essenciais neste período. Agradeço especialmente a Marisa e Samara, minhas companheiras inseparáveis durante todo este período. Por vezes vocês foram a voz quando me faltaram palavras e o suporte que eu precisava para seguir em frente. Nossos cafés, almoços, tardes e noites na BU deixarão saudades.

À toda a equipe da CASAN que contribuiu para a realização deste trabalho, disponibilizando os dados, orientando e participando ativamente de etapas.

Ao professor Paulo Belli e a Sandra, que aceitaram me orientar e sempre estiveram disponíveis para me ajudar e sanar minhas dúvidas.

E por fim, à UFSC pelo ensino gratuito e de qualidade oferecido durante todo este período.

RESUMO

O aumento populacional e o estilo econômico eminente na atualidade estão provocando forte pressão sobre os recursos naturais. O planeta não está sendo capaz de prover matéria prima e absorver as emissões oriundas do processo na mesma velocidade em que ocorrem, caminhando para um nível de degradação irreversível. É necessário que a sociedade mude seus hábitos e substitua o estilo de consumo linear pelo circular. Sob esta ótica, a mudança de paradigma sob as ETEs convencionais se faz necessária, para que se adequem a moldes ambientalmente mais sustentáveis, fazendo, entre outras coisas, o reaproveitamento dos subprodutos gerados no tratamento. Assim, realizou-se um diagnóstico operacional da ETE Insular – Florianópolis/SC, onde constatou-se que são gerados como subprodutos o efluente final e o lodo desaguado, dispostos na Baía Sul e em aterro sanitário, respectivamente. A análise dos resultados laboratoriais disponibilizadas pela CASAN revelou que o efluente final não se enquadra nas classes de reuso conforme a NBR 13969/93, principalmente devido ao parâmetro de coliformes termotolerantes. Igualmente acontece com o lodo desaguado, caracterizado conforme pesquisa bibliográfica e que não atende a todos os parâmetros estabelecidos para reaproveitamento no solo. Com isto, realizou-se um levantamento de propostas para a otimização sustentável na estação e que posteriormente foram hierarquizadas pelo método AHP. A melhor proposta para a reutilização do efluente final como água de reuso foi a empresa que presta serviços terceirizados na desobstrução de redes coletoras de esgoto e a melhor proposta para o lodo desaguado foi o reaproveitamento agrícola.

Palavras- chave: ETE sustentável. Água de reuso. Lodo.

ABSTRACT

The population increase and the eminent economic nowadays are causing strong pressure on natural resources. The planet is not able to supply raw material and absorb process emissions in the same proportion as they occur, heading towards an irreversible degradation level. It is necessary for society to change its habits and replace the linear consumption style with the circular one. From this perspective, a paradigm shift on conventional WWTP is necessary, so that they adapt to environmentally healthier models, making, among other things, the reuse of by-products generated in the treatment. Thus, an operational diagnosis of the WWTP Insular - Florianópolis/SC was carried out, where it was found that the final effluent and the dewatered sludge are generated as by-products, disposed in the South Bay and in a sanitary landfill, respectively. The analysis of laboratory results provided by CASAN revealed that the final effluent does not fit into the reuse classes according to NBR 13969/93, mainly due to the parameter of thermotolerant coliforms. The same happens with the dewatered sludge, characterized according to bibliographic research and that does not comply with all the parameters established for reuse in the soil. With this, a survey of proposals for sustainable optimization at the station was carried out, which were later classified by the AHP method. The best proposal for the reuse of the final effluent as reuse water was the company that provides outsourced services in clearing of sewage collection networks and the best proposal for the dewatered sludge was agricultural reuse.

Keywords: sustainable *WWTP*. Reuse water. Sludge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	7
Figura 2: Sistema econômico linear.....	7
Figura 3: Sistema econômico circular	8
Figura 4 Fluxograma do processo de lodos ativos modalidade aeração prolongada	12
Figura 5 Exemplo de meio suporte utilizado no processo MBBR.....	13
Figura 6 Demandas de uso da água na Bacia Hidrográfica do Atlântico Sul	15
Figura 7 Sistema linear de consumo da água.....	15
Figura 17 Modalidades de reuso direto para fins não potáveis	21
Figura 8 Fluxograma da metodologia adotada	25
Figura 9: Estação de tratamento de esgoto Insular	26
Figura 10: Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto Insular	26
Figura 11: Unidades presentes no pré-tratamento.....	27
Figura 12 Caçambas estacionárias para retirada de detritos do pré-tratamento.....	28
Figura 13 Unidades do tratamento biológico.....	28
Figura 14: Aerador instalado.....	29
Figura 15 Unidades de tratamento da fase sólida.....	30
Figura 16 Layout geral da ETE Insular após obras de manutenção e modernização	31
Figura 18: Estruturação hierárquica do problema	40
Figura 19 Sistema de água de reuso instalado na ETE Insular	45
Figura 20 Utilização da água de reuso nos procedimentos operacionais da ETE Insular	45
Figura 21 Perfuração do solo para colocação de estacas na obra de ampliação e modernização da ETE Insular.....	46
Figura 22 Estrutura para hierarquização pelo método AHP da melhor alternativa de reutilização do efluente final como água de reuso da ETE Insular, Florianópolis/SC.	56
Figura 23 Estrutura para hierarquização pelo método AHP da melhor alternativa de reutilização do lodo desaguado da ETE Insular, Florianópolis/SC.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Principais eventos e acordos globais sobre meio ambiente e desenvolvimento sustentável.....	5
Quadro 2: Características das economias linear e circular	9
Quadro 3 Principais subprodutos gerados no tratamento de esgoto	11
Quadro 4 Comparação entre ETEs convencionais e sustentáveis	17
Quadro 6 Relação entre as metas e as otimizações sustentáveis em ETEs	18
Quadro 7 Comparação de parâmetros após obras de ampliação e modernização ...	32
Quadro 8 Coleta de informações sobre a ETE Insular	32
Quadro 9 Parâmetros de análises do efluente final da ETE Insular	34
Quadro 10 Parâmetros físico-químicos analisados e metodologia utilizada	35
Quadro 11 Classificação dos usos preponderantes conforme a Classe	36
Quadro 12 Escala fundamental de Saaty	41
Quadro 13 Potenciais usuários para utilização da água de reuso produzida na ETE Insular, Florianópolis/SC.....	52
Quadro 14 Possíveis cenários de consumo utilizada pela ASA Prestadora de serviços.....	53
Quadro 15 Alternativas para reuso do efluente final da ETE Insular, Florianópolis/SC	53
Quadro 16 Alternativas para reutilização do lodo desaguado produzido na ETE Insular, Florianópolis/SC.....	54
Quadro 17 Critérios selecionados para a aplicação do método AHP na seleção da melhor alternativa de reuso do efluente final	54
Quadro 18 Critérios selecionados para a aplicação do método AHP na seleção da melhor alternativa de reuso do lodo desaguado.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Característica do lodo ao longo das etapas do tratamento de lodos ativados modalidade aeração prolongada.....	16
Tabela 2 Síntese das informações relativas à ETE	30
Tabela 3 Parâmetros e valores da qualidade da água de reuso	36
Tabela 4 Concentrações máximas admissíveis para substâncias inorgânicas.....	37
Tabela 5 Concentrações máximas admissíveis de patógenos	38
Tabela 6 Índice Randômico Médio do AHP.....	42
Tabela 7 Quantidade total gerada e destinação final dos subprodutos do tratamento gerados na ETE Insular	43
Tabela 8 Estimativa de custos com o tratamento do efluente final - ETE Insular, Florianópolis/SC.....	47
Tabela 9 Custos com a destinação final do lodo desaguado na ETE Insular, Florianópolis/SC.....	47
Tabela 10 Custo relativo à coleta e o transporte do lodo desaguado na ETE Insular, Florianópolis/SC.....	48
Tabela 11 Custo relativo à disposição final em aterro sanitário.....	48
Tabela 12 Custo total com para disposição do lodo gerado na ETE Insular, Florianópolis/SC.....	48
Tabela 13 Média dos resultados das análises do efluente final da ETE Insular, Florianópolis/SC.....	49
Tabela 14 Médias dos resultados das análises referente ao lodo pós desidratação da ETE Insular, Florianópolis/SC.....	51
Tabela 15 Hierarquização dos critérios em relação a meta global para reutilização efluente final como água de reuso	56
Tabela 16 Hierarquização das alternativas em relação aos critérios para reutilização efluente final como água de reuso	57
Tabela 17 Matriz de prioridade global para reutilização efluente final como água de reuso	58
Tabela 18 Hierarquização dos critérios em relação a meta global para reutilização do lodo desaguado.....	60
Tabela 19 Hierarquização das alternativas em relação aos critérios para reutilização do lodo desaguado	61
Tabela 20 Matriz de prioridade global para reutilização efluente final como água de reuso	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de esgoto
EUA	Estados Unidos da América
MBBR	<i>Moving bed biofilm reactor</i>
ODS	Objetivos de desenvolvimento sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TAS	Tanque de água de serviço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	JUSTIFICATIVA	3
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
4.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	4
4.2	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	6
4.3	ECONOMIA CIRCULAR	7
4.4	PANORAMA DO TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL	9
4.5	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO CONVENCIONAIS	10
4.5.1	Lodos ativados por aeração prolongada	12
4.7.2	Moving bad biofilm reactor	13
4.6	PRODUTO E SUBPRODUTOS GERADOS EM ETES	13
4.6.1	Gasoso	14
4.6.2	Líquido	14
4.6.3	Sólido	15
4.7	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO SUSTENTÁVEIS	17
4.7.1	Água de reuso	20
4.7.3	Lodo desaguado	21
4.7.3.1	Reaproveitamento agrícola	21
4.7.3.2	Recuperação de áreas degradadas	22
4.7.3.3	Fabricação de agregados leves	23
4.7.3.4	Fabricação de Cimento Portland	24
5	METODOLOGIA	25
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	25
5.2	DIAGNÓSTICO DA DESTINAÇÃO DOS PRODUTOS E SUBPRODUTOS DA ETE E CUSTOS	32
5.3	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E BIOLÓGICAS	33
5.3.1	Efluente final	33
5.3.2	Lodo e espuma	34
5.4	LEGISLAÇÃO	35
5.4.1	Efluente final	35

5.4.2	Lodo e espuma	37
5.5	LEVANTAMENTO DAS PROPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL	38
5.5.1	Efluente final	38
5.5.2	Lodo e espuma	39
5.6	HIERARQUIZAÇÃO DAS PROPOSTAS.....	39
5.6.1	Estruturação do problema	40
5.6.2	Matriz de prioridades de critérios	40
5.6.3	Verificação da consistência da matriz	41
5.6.4	Matriz de prioridades de alternativas	42
5.6.5	Matriz de prioridade geral	42
6	RESULTADOS	43
6.1	DIAGNÓSTICO OPERACIONAL E DESTINAÇÃO ATUAL DOS SUBPRODUTOS GERADOS.....	43
6.2	CUSTOS ATRELADOS AO TRATAMENTO	46
6.2.1	Efluente final	46
6.2.2	Lodo e espuma	47
6.3	CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO E SUBPRODUTO	48
6.3.1	Efluente final	49
6.3.2	Lodo e espuma	50
6.4	PROPOSTAS DE USOS SUSTENTÁVEIS.....	51
6.4.1	Água de reuso	51
6.4.2	Lodo e espuma	54
6.5	ANALYTIC HIERARCHY PROCESS	54
6.5.1	Água de reuso	54
6.5.2	Lodo e espuma	59
7	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais sofrem relevante pressão por conta do aumento populacional e do desenvolvimento tecnológico, promovendo a ampliação da demanda de consumo de diversos bens e produtos. A capacidade do planeta em prover matéria prima e absorver as emissões oriundas do processo está em descompasso com a velocidade em que as mesmas são retiradas e depositadas no meio ambiente (BRETAS; MELO, 2018a).

Neste cenário busca-se colocar o planeta nos trilhos do desenvolvimento sustentável, fortalecendo e integrando seus três pilares: o econômico, o social e o ambiental, a fim de garantir um futuro economicamente viável, socialmente justo e ambientalmente equilibrado para as próximas gerações.

É necessário o engajamento de toda a sociedade na mudança de hábitos de consumo para que o planeta tenha chance de se recuperar. O sistema econômico linear deve ser substituído pelo pensamento circular, pois na atual conjuntura, as tecnologias rapidamente tornam-se obsoletas e as necessidades dos seres humanos, ainda que supérfluas, aumentam o consumo, provocando o crescimento da demanda por matéria prima e geração dos mais diversos tipos de resíduos, que impactam o meio ambiente de forma negativa.

Este modelo econômico circular também pode ser empregado em questões relativas ao saneamento, uma vez que tratar os esgotos sanitários é fundamental para proteger a saúde pública, preservar o meio ambiente e salvaguardar a qualidade de vida da população (BRASIL, 2019).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2021a), 2.807 municípios contam com sistemas públicos de esgotamento sanitário e 1.937 utilizam soluções alternativas individuais, sendo que a amostra analisada abrange 4.744 municípios, um total de 85,2% dos 5.570 existentes do país.

O esgoto coletado pelas redes é tratado em estações de tratamento de esgoto (ETEs) majoritariamente convencionais, que tem como objetivo principal o enquadramento do efluente final aos padrões de lançamento estabelecidos para disposição no corpo receptor. Porém, quando estes sistemas são mal concebidos, construídos ou operados, resultam em problemas gravíssimos, como aumento dos custos operacionais e de perda de eficiência nas ETEs, comprometendo os benefícios gerados em função dos impactos negativos causados (INCT ETEs sustentáveis, 2022).

Na busca por soluções ambientalmente mais adequadas, os conceitos de ETE sustentáveis têm por objetivo empregar um novo olhar sobre as estações, a fim de se estabelecer uma mudança de paradigma com relação ao esgoto, passando a enxergá-lo como um recurso e não um passivo ambiental, contribuindo para questões globais como os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS).

Sob esta ótica, o reaproveitamento de resíduos sólidos, líquidos e gasosos gerados no tratamento são práticas importantes no que diz respeito às atitudes

ambientalmente sustentáveis, pois concedem fins mais nobres para estes materiais e podem proporcionar geração de renda para a empresa.

Assim, realizou-se um estudo de caso na ETE Insular – Florianópolis/ SC operada pela concessionária de saneamento do Estado. A Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) é a concessionária que atua no abastecimento de água e esgotamento sanitário no Estado de Santa Catarina. É uma sociedade anônima de economia mista e de capital aberto criada em 31 de dezembro de 1970 por meio da Lei Estadual nº 4.547 e constituída em 02 de julho de 1971 com objetivo de coordenar o planejamento e executar, operar e explorar os serviços públicos de esgoto e abastecimento de água potável, bem como realizar obras de saneamento básico, em convênio com os municípios do Estado (CASAN, 2021a).

Atualmente atende 195 municípios catarinenses com abastecimento de água e 25 municípios com esgotamento sanitário, possuindo ao todo 36 ETEs em operação. Tem como missão fornecer água tratada, coletar e tratar esgotos sanitários, promovendo saúde, conforto, qualidade de vida e desenvolvimento sustentável.

O objetivo do presente trabalho foi propor alternativas de uso mais sustentáveis para o efluente final e o lodo que são gerados na ETE Insular, a fim de tornar o processo de tratamento mais alinhado com os conceitos de ETEs sustentáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral propor alternativas de usos sustentáveis para o efluente final e o lodo gerados na Estação de Tratamento de Esgoto Insular – Florianópolis/SC a fim de tornar o processo de tratamento mais alinhado com os conceitos de ETEs sustentáveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar a destinação final atual do efluente final e lodo gerados e seus respectivos custos;
- Propor alternativas de uso mais sustentáveis para os produtos e subprodutos gerados, efluente final e lodo, respectivamente, com vistas à sustentabilidade do processo de tratamento;
- Hierarquizar as propostas de otimização pelo método *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

3 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, os debates acalorados sobre sustentabilidade, impactos ambientais e mudanças climáticas ascenderam-se mundialmente. A preocupação acionou um alerta em diversos segmentos da sociedade no anseio de conter os desequilíbrios ecológicos que vem colocando em risco a vida no planeta para as futuras gerações.

A engenharia sustentável equilibra as perspectivas de melhora na qualidade de vida, equidade e inclusão social. Os profissionais desta área devem buscar de forma criativa, inovadora e integrada, entre outros aspectos, o uso eficiente dos recursos naturais, mínimo impacto negativo e máximo impacto positivo nas pessoas e no meio ambiente, utilização de recursos renováveis e recicláveis e avaliação sensata da capacidade do ambiente de se regenerar enquanto sistema ecológico (BRETAS; MELO, 2018a).

A fim de aderir a esta nobre causa, o estudo tem o intuito de propor alternativas de usos sustentáveis para o efluente final e o lodo gerados na ETE Insular a fim de tornar o processo de tratamento mais alinhado com os conceitos de ETEs sustentáveis.

Esta ação contribui para CASAN, companhia de saneamento que opera a estação, que é signatária do Movimento ODS Santa Catarina desde 2020 e está em busca do

alinhamento da cultura da empresa com os objetivos e metas do desenvolvimento sustentável.

Portanto, dada a devida relevância do tema, o presente trabalho visa contribuir para a geração de informações necessárias para alcançar o conjunto de objetivos propostos.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Para Elkington (2012) a sustentabilidade é o princípio que assegura que as ações de hoje não limitarão as opções econômicas, sociais e ambientais para as gerações futuras. É a busca pela conciliação entre as necessidades humanas com a capacidade do planeta em absorvê-las. O desenvolvimento sustentável baseia-se em três pilares: o econômico, o social e o ambiental. Para se obter sucesso é necessário harmonizar crescimento econômico, benefício social e alta qualidade ambiental (DODDS, 2005). Esses elementos são interligados e fundamentais para o bem-estar dos indivíduos e das sociedades.

O conceito de sustentabilidade surgiu há mais de 400 anos. Nos primórdios da Idade Moderna, a madeira era a principal matéria-prima utilizada pelo homem na construção de casas, aparelhos agrícolas e barcos, provocando o início da escassez das florestas. Foi na Alemanha, no ano de 1560, mais especificamente na Província da Saxônia que nasceu a Silvicultura, ciência que estuda o manejo das florestas, e com ela, a palavra alemã *Nachhaltigkeit*, que significa sustentabilidade (BOFF, 2017).

Em 1970 foi fundado o Clube de Roma, cujo primeiro relatório foi intitulado “*Os limites do crescimento*”. Este propunha a desaceleração do desenvolvimento industrial nos países desenvolvidos e do crescimento populacional nos países subdesenvolvidos. “O alarme ecológico provocado por este relatório levou a ONU a ocupar-se do tema. Assim, realizou [...] em 1972 em Estocolmo a Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente” (Boff, 2017, pag.34).

Então em 1987, 15 anos após a Conferência de Estocolmo, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMED), publicou o relatório “*Brundtland: Our common future*” que apontou a incompatibilidade entre o desenvolvimento sustentável e os padrões de produção e consumo da época e apresentou o conceito de desenvolvimento sustentável ao mundo. Segundo definição clássica: “Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazer suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1991, pag.46).

Desde então, realizaram-se diversos eventos globais e firmaram-se numerosos acordos sobre o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável (Quadro 1).

Quadro 1 Principais eventos e acordos globais sobre meio ambiente e desenvolvimento sustentável

Ano	Conferência/ Acordo	Pauta	Resultado
1992	Eco-92/ Rio 92/ Cúpula da Terra	Buscou-se analisar a evolução das políticas de proteção ambiental, decidir medidas para minimizar a degradação ambiental e definir ações para enfrentar problemas crescentes como a de emissões de gases do efeito estufa	Elaborou cinco documentos: Agenda 21, Convenção da Biodiversidade, Convenção das Mudanças Climáticas- Declaração de princípios sobre florestas, Declaração do Rio sobre Ambiente e Desenvolvimento e Carta da Terra
1997	Conferência das Nações Unidas sobre o Clima (CPO3)	Tinha como objetivo principal estabelecer um acordo entre os países industrializados para reduzir a emissão de gases do efeito estufa	Elaborou o Protocolo de Quioto
2002	Conferência Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável (Rio+10)	Avaliou os avanços e identificou os obstáculos. Transformou as metas, promessas e compromissos da Agenda 21 em ações concretas e tangíveis	Elaborou dois documentos: Plano de implementação e Declaração de Joanesburgo sobre Desenvolvimento Sustentável
2012	Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20)	Discutiu-se sobre a renovação do compromisso político com o desenvolvimento sustentável. Adotaram-se decisões prospectivas sobre energia, segurança alimentar, oceanos e cidades, resultando em mais de 700 compromissos voluntários	Elaborou o documento: O Futuro Que Queremos
2015	Cúpula das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável	Concluiu as negociações da Agenda 2030 e deu origem ao documento que propõe os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e as 169 metas correspondentes	Elaborou a Agenda 2030, 17 ODS e as 169 metas correspondentes.
	21ª Conferência das Partes (COP21)	O objetivo principal era um novo acordo global sobre mudança climática.	Elaborou o Acordo de Paris
2021	Conferência do Clima (COP26)	Resultou em um pacote de decisões para construir resiliência às mudanças climáticas, redução das emissões de gases do efeito	Elaborou o Pacto Climático de Glasgow

		estufa e financiamento para ambos. Trabalhar com os planos já existentes para a redução dos gases do efeito estufa a fim aumento na temperatura média global possa ser limitado a 1,5 grau. reduzir gradualmente a energia do carvão e os subsídios ineficientes para os combustíveis fósseis	
--	--	---	--

Fonte: CETESB, 2012; Bretas e Melo, 2018a; Mountford, 2021; UNFCCC, 2021.

4.2 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável levam em consideração o legado dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio e buscam avançar em metas não alcançadas. Foram adotados pelos 193 países-membros da ONU e fazem parte do documento “*Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*”. Ao todo são 17 objetivos (

Figura 1) e 169 metas integradas e indivisíveis que definem as prioridades e aspirações globais a serem atingidas até 2030, mesclando, de forma equilibrada, os três pilares do desenvolvimento sustentável: o social, o econômico e o ambiental (ONU, 2015).

Este conjunto de ações representa uma oportunidade sem precedentes para eliminar a pobreza extrema e para colocar o mundo em uma trajetória sustentável. Seu sucesso depende demasiadamente das ações e colaborações de todos os setores (UN GLOBAL COMPACT, 2020). A agenda busca incentivar as atitudes dos próximos 15 anos, pautada em cinco áreas de fundamental importância: pessoas, planeta, prosperidade, paz e parcerias.

Os ODS que podem ser alcançados com o presente trabalho são:

- Objetivo 2: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhora da nutrição e promover a agricultura sustentável
- Objetivo 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e o saneamento para todos
- Objetivo 7: Assegurar a todos o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia
- Objetivo 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação
- Objetivo 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis
- Objetivo 12: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis

Figura 1 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

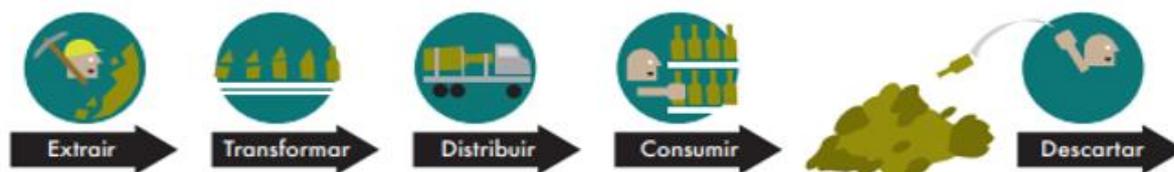


Fonte: GTSC A2030, 2022.

4.3 ECONOMIA CIRCULAR

Uma das contribuições que a engenharia pode proporcionar ao desenvolvimento sustentável é o aprimoramento do modelo econômico circular em substituição ao modelo que predomina atualmente, a economia linear. Esta é pautada na extração de recursos naturais, sendo ela matéria-prima ou energia, para transformação em bens e produtos, distribuição aos clientes, consumo e posterior descarte no meio ambiente sob a forma de resíduo (BRETAS; MELO, 2018b), como mostra a Figura 2. Este modelo econômico está causando o esgotamento acelerado dos recursos finitos do planeta, além de uma enorme geração de resíduos.

Figura 2: Sistema econômico linear



Fonte: Bretas e Melo, 2018b.

Para Fonseca (2020), a economia circular surge como uma proposta conveniente para manter crescimento econômico e desenvolvimento sustentável. Esta estratégia

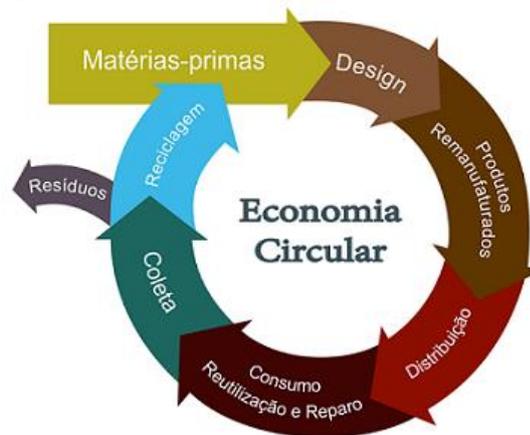
baseia-se no desenvolvimento econômico de alta eficiência e com baixas emissões, onde todas as matérias-primas e energia são mantidas e reutilizadas direcionando as perdas para novas aplicações produtivas, tornando-se fundamental para reduzir a pressão sobre os recursos naturais e sobre a capacidade da natureza em regenerar estes resíduos.

A Fundação Ellen Macarthur (2022), responsável por inserir o tema na agenda de governos, empresas e academias, define economia circular como uma economia regenerativa e restaurativa por princípio, que tem como objetivo manter produtos, componentes e materiais em seu nível mais alto de utilidade e valor o tempo todo, baseando-se em três princípios:

- Eliminação dos resíduos e da poluição desde o princípio;
- Produtos e materiais mantidos em uso; e
- Regeneração de sistemas naturais.

O modelo de economia circular, Figura 3, fundamenta-se em ações voltadas para a redução, regeneração, compartilhamento, otimização, ciclagem, troca e eco design, fechando o círculo produtivo. Fontes de energia renováveis são priorizadas visando reduzir a dependência de recursos finitos. Desperdícios e utilização de materiais tóxicos são intencionalmente excluídos e polímeros e ligas metálicas são projetados para recuperação e renovação com baixo emprego de energia. (BRETAS; MELO, 2018b).

Figura 3: Sistema econômico circular



Fonte: adaptado República Portuguesa, 2022.

A economia circular trabalha com a inovação em toda a cadeia de valor, não dependendo de soluções somente no final da vida do produto. Em todas as etapas do processo de produção há oportunidades de redução de custos e independência de recursos naturais. Elas são interligadas a fim de minimizar os recursos que escapam do círculo, como forma de otimização do sistema. O eco design é uma fase importante do processo, pois tem o objetivo de facilitar o reuso, a reciclagem e o aproveitamento

de produtos em múltiplos ciclos (FONSECA, 2020). O Quadro 2 apresenta um resumo com as principais características de cada modelo econômico citado.

Quadro 2: Características das economias linear e circular

Economia linear	Economia circular
Uso descontrolado de matéria prima e energia	Redução no consumo de matéria prima e energia
Descarte dos produtos após o uso	Reciclagem
Obsolescência programada	Eco design
Produtos descartáveis	Produtos duráveis
Grande produção de resíduos	Mínima produção de resíduos
Preocupação apenas com o resíduo gerado ao final do processo	Inovação em toda a cadeia de produção

Fonte: autora, 2022.

4.4 PANORAMA DO TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL

Dá-se o nome de esgoto, às águas que possuem suas características naturais alteradas após as diversas modalidades de uso (BRASIL, 2019a). O esgoto doméstico é composto por aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de substâncias incorporadas após sua utilização, incluindo sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos (VON SPERLING, 2018a). Para Metcalf e Eddy (2016) as principais fontes do esgoto domésticos são a excreta humana, águas de banho, águas de procedimento de alimentos e de produtos de manutenção pessoais e de limpeza, juntos a uma grande variedade de traços de outros compostos orgânicos e inorgânicos.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2021a), 2.807 municípios (59,2%) contam com sistemas públicos de esgotamento sanitário e 1.937 (40,8%) utilizam soluções alternativas individuais, sendo que a amostra analisada abrange 4.744 municípios, um total de 85,2% dos 5.570 existentes do país.

No Brasil, em 2020, o volume de esgoto coletado pelos prestadores de serviço participantes foi de 6 bilhões de m³, sendo que 4,8 bilhões de m³ foram tratados. Ao todo, a população atendida com rede pública coletora de esgoto foi de 114,6 milhões de pessoas, sendo 112,4 milhões pertencentes a área urbana. O índice de tratamento de esgoto gerado nos municípios abrangidos foi de 50,8% (BRASIL, 2021a).

Na região Sul do país, o volume de esgotos coletado pelos prestadores de serviço participantes foi de 692,8 milhões de m³, sendo que destes, 649,7 milhões de m³ foram tratados. Ao todo, a população atendida com rede pública coletora de esgoto foi de 14,3 milhões de pessoas, sendo 14 milhões pertencentes a área urbana. O índice de tratamento do volume de esgoto gerado foi de 46,7% (BRASIL, 2021a).

Em Santa Catarina, o índice de atendimento urbano com redes coletoras de esgoto é de 30,4%, sendo que o volume de esgoto gerado foi de 31,3% e o índice de tratamento de esgoto coletado foi de 98,7% (BRASIL, 2021a).

Pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) (BRASIL, 2019), o atendimento adequado de esgotamento sanitário engloba os serviços de coleta e tratamento coletivos e o tratamento individual por meio de fossas sépticas. Neste contexto, considera-se que 55% da população brasileira possui atendimento adequado.

Quando não coletados, os efluentes possuem diversos destinos, podendo ser encaminhados para fossas negras, lançados em redes de águas pluviais e sarjetas, podem ser dispostos diretamente no solo ou nos corpos d'água resultando em uma parcela significativa de carga poluidora chegando nos corpos hídricos, impactando negativamente os usos múltiplos da água (BRASIL, 2017).

A Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011 estabelece em seu Art. 21 as condições e padrões para lançamento direto nos corpos receptores de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgoto. Dentre as exigências, o tratamento dos efluentes deve apresentar remoção mínima de 60% de DBO (BRASIL, 2011).

Segundo o PLANSAB (BRASIL, 2019), o governo brasileiro pretende investir, até 2033, mais de 500 bilhões de reais no setor de saneamento, principalmente na coleta e tratamento de esgotos sanitários.

4.5 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO CONVENCIONAIS

A falta de soluções adequadas para a coleta, tratamento e disposição final dos efluentes, favorece a precarização do saneamento, a proliferação de doenças e causa a degradação dos corpos hídricos (BRASIL, 2019). O lançamento inadequado do esgoto no ambiente pode causar, entre outros aspectos, poluição do solo, degradação de mananciais de abastecimento de água, deterioração da biota aquática, eutrofização, assoreamento dos corpos d'água e desequilíbrio ambiental (BRASIL, 2019a). Desta maneira, a fim de evitar o impacto negativo ao meio ambiente, os efluentes das redes coletoras são transportados até as ETEs.

A escolha do processo de tratamento de uma estação relaciona exigências legais, ambientais e de saúde pública, além de considerar as características do corpo receptor, legislação vigente, aspectos econômicos, sociais, operacionais, de disponibilidade de área e até mesmo, os anseios da comunidade (BRASIL, 2017). A concepção de escolha do processo deve definir com clareza o impacto ambiental do lançamento no corpo receptor, os objetivos e nível do tratamento e eficiências de remoção desejadas (VON SPERLING, 2018a).

Pode-se classificar o tratamento do efluente por meio de níveis: preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar promove a remoção de sólidos grosseiros, materiais de maiores dimensões e areia. O tratamento primário

visa a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e, em decorrência, parte da matéria orgânica. O tratamento secundário tem por objetivo principal a remoção da DBO em suspensão, DBO em suspensão finamente particulada, DBO solúvel e eventualmente nutrientes (nitrogênio e fósforo). O tratamento terciário remove poluentes específicos, nutrientes, organismos patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e sólidos em suspensão remanescentes (VON SPERLING, 2018a).

No Brasil são encontrados diferentes processos de tratamento. Segundo a ANA (BRASIL, 2017) foram identificadas 2.768 ETES em operação, atendendo a população estimada de 71,7 milhões de habitantes. Distribuídas pelo país, predominam ETES com eficiência média de remoção de DBO na faixa de 60 a 80%.

O processo de tratamento de esgotos convencional gera produtos e subprodutos nas fases sólida, líquida e gasosa, que serão abordados com maior riqueza de detalhes nos tópicos seguintes. No Quadro 3 são indicados os principais subprodutos gerados, bem como as destinações finais mais empregadas no país e o impacto negativo que causa ao meio.

Quadro 3 Principais subprodutos gerados no tratamento de esgoto

Fase	Produto/ Subproduto	Destinação final	Impacto negativo
Gasosa	Biogás	Queimadores	- Ineficiência do equipamento - Emissões odorantes - Emissões de metano na atmosfera - Perde de potencial energético
Líquida	Efluente final tratado	Corpo receptor	- Perda de nutrientes - Poluição das águas - Toxicidade aquática
Sólida	Lodo e espuma	Aterros sanitários ou lixões	- Gastos com transporte - Emissão de gases de efeito estufa (GEE) - Redução da vida útil dos aterros

Fonte: adaptado Aisse, 2019.

A maior parte das ETES em operação no Brasil têm como foco principal o atendimento aos padrões de lançamento do efluente final no corpo receptor. Quando projetadas, construídas e operadas corretamente, podem alcançar elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos, cumprindo com seu papel primordial, a proteção hídrica. Contudo, na situação atual brasileira, a maioria das estações apresenta algum tipo de problema operacional, fazendo com que os custos se elevem, haja perda de eficiência e descumprimento da legislação ambiental (CHERNICHARO, 2021).

Práticas antigas e problemáticas atuais como projetos hidráulicos inadequados que causam a perda de carga excessiva, projetos ineficientes de sistemas de aeração, desconsideração da importância de sistemas de tratamento primários, restrição ao reuso de lodos e a opções de disposição final, locação de ETES sem considerar o

potencial reuso de água, considerações sobre energia de recalque e impactos potenciais ao aumento do nível do mar, contribuem para a perda de eficiência nas estações (METCALF; EDDY, 2016).

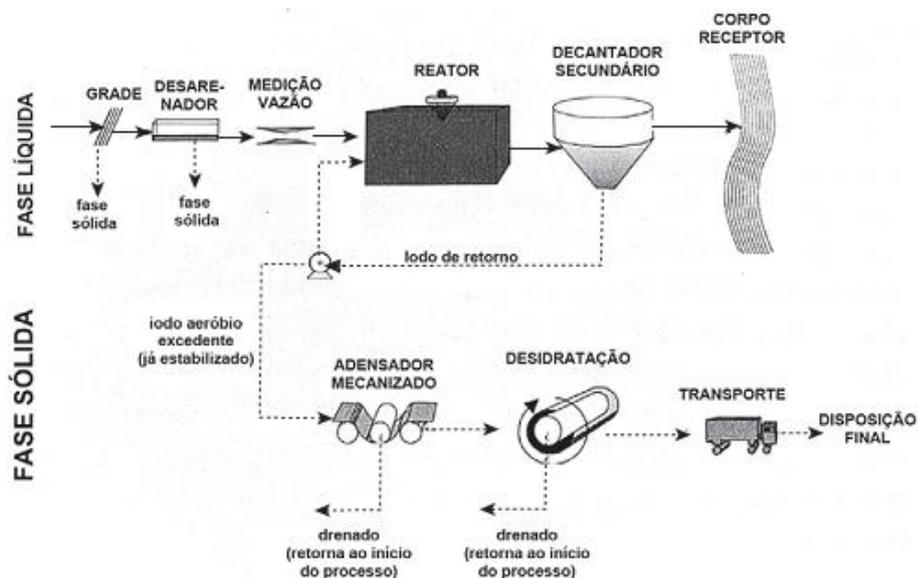
Existem diversas tecnologias de tratamento, como lodos ativados, lagoas de estabilização e reatores UASB (*Upflow Anaerobi Sludge Blanket*). A seguir, será abordado o tratamento de lodos ativados modalidade aeração prolongada, que é a tecnologia utilizada na ETE desta pesquisa.

4.5.1 Lodos ativados por aeração prolongada

Uma das tecnologias amplamente aplicadas para o tratamento de esgoto é o processo de lodos ativados e suas variantes, que podem ser classificadas em função da idade do lodo.

Segundo Von Sperling (2018a), a modalidade lodos ativados por aeração prolongada possui idade do lodo elevada na faixa de 18 a 30 dias, tornando a carga de DBO aplicada por unidade de volume baixa. A estabilização da biomassa ocorre no próprio tanque de aeração e não há a necessidade de decantadores primários. É um processo que apresenta elevada eficiência na remoção de DBO, baixos requisitos de área, geração de lodo reduzida e operação mais simples em comparação a modalidade convencional, além de apresentar satisfatória independência das condições climáticas. Em contrapartida, apresenta baixa eficiência na remoção de coliformes, elevados custos de implantação e operação, elevado índice de mecanização que proporciona alto consumo de energia e necessidade de remoção da umidade do lodo e disposição desse subproduto (VON SPERLING, 2018b). O fluxograma do processo é apresentado na Figura 4.

Figura 4 Fluxograma do processo de lodos ativos modalidade aeração prolongada



Fonte: Von Sperling, 2018b.

Atualmente, a ETE Insular passa por obras de ampliação e modernização do tratamento. O processo de lodos ativados por aeração prolongada será substituído pelo MBBR.

4.7.2 Moving bed biofilm reactor

O *Moving bed biofilm reactor* (MBBR) é uma variante do processo de lodos ativados. O conceito fundamental é a incorporação de um meio suporte para o crescimento aderido de biomassa, dentro do reator biológico. Desta maneira, passam a conviver dentro do tanque a biomassa suspensa, do próprio processo de lodos ativados e a biomassa aderida ao material, na forma de biofilme. Usualmente empregam-se materiais plásticos como meio suporte (Figura 5), por conta de sua densidade baixa e grande área superficial (VON SPERLING, 2018b).

O processo MBBR demanda menor volume para os reatores biológicos, possui alta qualidade do efluente final, estabilidade quando ocorrem variações nas condições operacionais, como sobrecargas hidráulicas, orgânicas e alterações na composição do efluente, apresenta robustez, promove a remoção de nitrogênio, baixa produção de lodo e fácil operação. Porém, a manutenção é complicada, os custos com operação, manutenção e instalação são elevados, há geração de ruídos e alto consumo de energia (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Figura 5 Exemplo de meio suporte utilizado no processo MBBR



Fonte: adaptado CASAN, 2021b.

4.6 PRODUTO E SUBPRODUTOS GERADOS EM ETES

O reaproveitamento dos produtos e subprodutos é uma solução economicamente vantajosa e ambientalmente viável para os resíduos gerados a partir do tratamento de esgoto.

4.6.1 Gasoso

Os gases comumente encontrados no esgoto bruto são o nitrogênio (N₂), o oxigênio (O₂) e o metano (CH₄), gases que estão presentes na atmosfera e que conseqüentemente fazem parte de todas as águas expostas ao ar. Além disso, possui sulfeto de hidrogênio (H₂S), amônia (NH₃) e metano (CH₄) que são derivados da decomposição da matéria orgânica presente no esgoto (METCALF; EDDY, 2015).

O tratamento de águas residuárias produz uma variedade de gases, sendo eles o biogás, os gases odorantes e os gases emitidos a partir do esgoto e do lodo biológico nas unidades de tratamento da ETE. O biogás possui elevado poder calorífico e pode ser captado e reaproveitado energeticamente. Os gases odorantes são emissões gasosas que causam mau cheiro, se dispersam no ar e sofrem influência das condições meteorológicas, topográficas e de uso e ocupação do solo. Os gases emitidos nos processos de tratamento podem causar problemas como corrosão de elementos de concreto e metais, riscos ocupacionais, perdas energéticas, intensificação do efeito estufa, ambiente insalubre para os trabalhadores, podendo causar incômodos à vizinhança. Por isso, é necessário que haja um gerenciamento adequado das emissões gasosas odorantes, com intuito de reduzir o impacto real sobre as pessoas e o seu bem-estar (BRANDT *et al.*, 2021).

O biogás é composto majoritariamente por metano, uma substância inflamável, inodora, incolor, com densidade menor que a do ar, poder calorífico menor ou igual a 50 MJ/Kg, além de ser um gás indutor do efeito estufa, com potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o valor atribuído ao dióxido de carbono. Por isto, a coleta e reutilização do biogás em ETEs caminha em paralelo com os conceitos de produção mais limpa, eficiência ambiental e energética, economia de baixo carbono, além do grande potencial energético associado a ele. No Brasil, infelizmente, a maior parte das ETEs, quando recupera o biogás, simplesmente o queima, desperdiçando seu potencial energético e por conseqüência seus benefícios econômicos, sociais e ambientais (BRASIL, 2016).

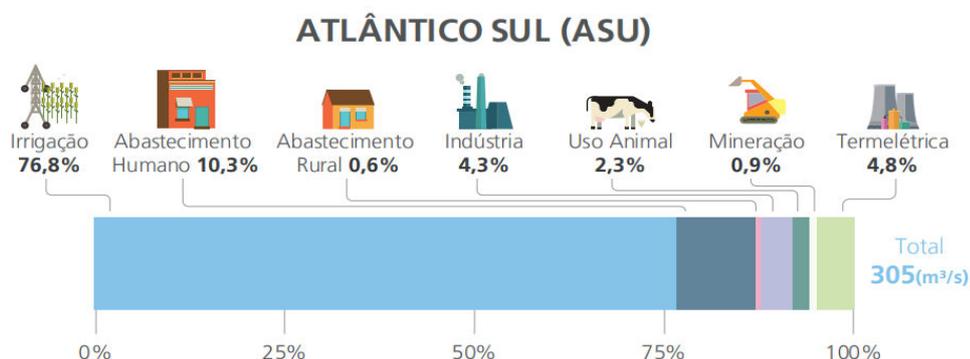
4.6.2 Líquido

Segundo a ANA (BRASIL, 2019b) os usos podem ser classificados como consuntivos e não consuntivos. Os principais usos consuntivos de água no Brasil são:

- Abastecimento humano urbano;
- Abastecimento humano rural;
- Abastecimento animal;
- Processos industriais;
- Mineração;
- Termoelétricas;
- Agricultura.

A Figura 6 apresenta a distribuição percentual de água potável, de acordo com sua aplicação, utilizada na Bacia Hidrográfica do Atlântico Sul, no qual está inserido o objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 6 Demandas de uso da água na Bacia Hidrográfica do Atlântico Sul

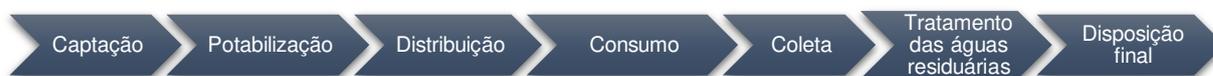


Fonte: ANA, 2017.

A gestão integrada dos efluentes nas ETEs é uma medida importante para evitar a contaminação dos corpos d'água por nutrientes (MOTA; VON SPERLING, 2009) e possibilita que a oferta de água potável seja destinada para fins essenciais, enquanto águas residuárias tratadas sejam destinadas para outros fins menos nobres (MOURA *et al*, 2020), sendo o efluente final o principal subproduto líquido gerado em uma ETE.

A Figura 7 representa o sistema linear de consumo de água que ocorre no país, desde a captação da água bruta até a disposição final do efluente tratado, que geralmente ocorre em corpos receptores.

Figura 7 Sistema linear de consumo da água



Fonte: adaptado Rodriguez (2020).

4.6.3 Sólido

“O termo ‘lodo’ tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos” (ANDREOLI *et al.*, 2014, pág. 11) e é o mal necessário de toda ETE (JORDÃO; PESSÔA, 2005). Atualmente, é um dos grandes problemas enfrentados pelas operadoras de saneamento, uma vez que a produção aumenta ao passo que o atendimento dos serviços de coleta e tratamento de esgotos é ampliado (ANDREOLI *et al.*, 2014). A disposição final é preocupante por conta de seu altíssimo potencial poluidor (metais pesados), elevada concentração de patógenos (coliformes fecais, *salmonella sp.*, ovos de helmintos e cistos de protozoários) e altas cargas de

contaminantes químicos (produtos de limpeza, cosméticos, higiene pessoal e remédios) (FREITAS; MELO, 2013).

O tratamento é uma atividade de grande complexidade e alto custo, cujo principal objetivo é a geração de um produto mais estável e com menor volume que facilite o manuseio e a redução dos custos nos processos seguintes do tratamento (FREITAS et al, 2019). Embora o lodo represente apenas de 1% a 2% do volume de esgoto tratado, o seu gerenciamento é bastante complexo e tem um custo geralmente entre 20% e 60% do total gasto com a operação de uma estação de tratamento de esgoto.

Em sistemas de lodos ativados por aeração prolongada, o lodo biológico ou secundário é composto pela biomassa microbiana absorvida e oxidada. É um resíduo com menor teor de matéria orgânica (lodo digerido) e maior teor de sólidos inorgânicos (Tabela 1 Característica do lodo ao longo das etapas do tratamento de lodos ativados modalidade aeração prolongada), por esta razão, também pode ser denominado de biossólido, como forma de valorização de seu potencial benéfico produtivo. Para que este termo possa ter adotado, é necessário ainda, que suas características químicas e biológicas sejam compatíveis com a utilização produtiva (ANDREOLI *et al.*, 2014).

Tabela 1 Característica do lodo ao longo das etapas do tratamento de lodos ativados modalidade aeração prolongada

Lodos ativados – aeração prolongada		
Lodo removido na fase líquida	Massa do lodo (gSS/hab.d)	40 – 45
	Teor de sólidos secos (%)	0,8 – 1,2
Lodo adensado	Massa do lodo (gSS/hab.d)	40 – 45
	Teor de sólidos secos (%)	5 – 3 (gravidade)
Lodo desidratado	Massa do lodo (gSS/hab.d)	40 – 45
	Teor de sólidos secos (%)	20 - 30 (filtro prensa) 15 - 20 (centrífuga)
	Volume de lodo (L.hab.d)	0,13 - 0,21 (filtro prensa) 0,19 - 0,29 (centrífuga)

Fonte: adaptado Andreoli *et al*, 2014.

A destinação final adequada do lodo tem sido negligenciada nas ETEs do Brasil. É comum que os projetos apresentados não contemplem a gestão dos resíduos, fazendo com que esta atividade seja realizada sem o planejamento necessário. Por esta razão, alternativas menos vantajosas de disposição final têm sido adotadas, comprometendo benefícios dos investimentos realizados nos sistemas de esgotamento sanitário e o meio ambiente (ANDREOLI *et al.*, 2014). Segundo Jordão e Pessôa (2005), deve-se ter uma visão abrangente das possibilidades e os seguintes aspectos devem ser conhecidos antes de se determinar a destinação final:

- Produção e caracterização do lodo gerado na ETE
- Presença de esgotos industriais no sistema, capazes de atribuir características especiais ao lodo
- Quantidade de lodo gerado na ETE, estimada para um período correspondente à vida de projeto do sistema de destinação final;

- Características especiais que possam interferir com o sistema de distribuição final, de natureza física, química e biológica, bem como as características geomecânicas do comportamento do lodo com vistas a seu possível lançamento em aterros sanitários

Uma das principais alternativas utilizadas para a disposição final é o remanejamento em aterros sanitários, uma prática de baixo custo, mas que possui potenciais impactos ambientais negativos, como poluição das águas, solo e ar, além de contribuir para o esgotamento da vida útil dos aterros. Neste contexto, é necessária a gestão sustentável deste resíduo de maneira a propor formas de implantação de alternativas ambientalmente adequadas e seguras (ANDREOLI *et al.*, 2014; PODKOWA *et al.*, 2015).

4.7 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO SUSTENTÁVEIS

Para Metcalf e Eddy (2016) no século XXI ocorreu uma mudança de paradigma em relação ao esgoto. Sob esta nova concepção, as águas residuárias são vistas como potenciais fontes de energia renovável, nutrientes recuperáveis e água potável. O foco e os processos do tratamento vêm modificando-se a fim de adaptar-se a esta nova perspectiva com o intuito de maximizar a eficiência de recuperação destes elementos. Segundo os autores, os projetos, construções e operações de sistemas de tratamento de esgoto devem considerar como cruciais os aspectos sustentáveis, bem como balanço integral de energia, emissão de gases de efeito estufa, uso total de produtos químicos, correspondente pegada de carbono e a destinação correta dos constituintes presentes no efluente e dos subprodutos gerados.

A proposta de ETEs sustentáveis tem como foco a economia circular (AISSE, 2019), com reaproveitamento ou a melhor utilização dos subprodutos líquidos, sólidos e gasosos gerados no tratamento (BRETAS; MELO, 2018a). Para enquadrar-se nesta categoria, a ETE deve ainda reduzir sua área ocupada, diminuir a produção de resíduos e de lodo, baixar o consumo de energia elétrica e de produtos químicos, além de minimizar os ruídos, odores e impactos visuais, arquitetônicos e paisagísticos, impactando positivamente e contribuindo para a comunidade (LEGNER, 2021).

O Quadro 4, apresenta um comparativo entre os conceitos de ETEs convencionais e sustentáveis.

Quadro 4 Comparação entre ETEs convencionais e sustentáveis

ETE CONVENCIONAL	ETE SUSTENTÁVEL
Economia linear	Economia circular
Esgoto é um passivo ambiental	Esgoto é um recurso
Tratamento gera custos	Tratamento gera receita
Foco é o atendimento aos padrões de lançamento	Foco é a recuperação dos subprodutos
Subprodutos líquido é lançado em um corpo receptor	Subproduto líquido é utilizado como um recurso hídrico

Subproduto sólido é descartado em aterro sanitário	Subproduto sólido é utilizado como fertilizante, combustível
Subproduto gasoso é queimado	Subproduto gera energia

Fonte: adaptado Chernicharo, 2021.

Apesar dos avanços nas questões referentes ao desenvolvimento sustentável e a economia linear, ainda persiste um déficit em projetos de estações de tratamento de esgoto no Brasil com adoção de medidas sustentáveis. A ausência da percepção do retorno financeiro, ambiental e social com a ETE preconiza um cenário com poucas iniciativas neste sentido no país.

Chernicharo (2021) elenca alguns pontos que considera como gargalos no Brasil:

- Atraso de décadas do setor de esgotamento sanitário resultado da estagnação nas décadas passadas
- Legislação que privilegia o tratamento convencional de esgoto
- Falta de incentivos fiscais para a recuperação e valorização dos subprodutos do tratamento de esgoto
- Falta de estudos de viabilidade econômico-financeira para a realidade brasileira
- Desenvolvimento tecnológico em descompasso com os avanços na área
- Poucos fornecedores de equipamentos robustos e apropriados à realidade nacional
- Pouco conhecimento disponibilizado para tomadores de decisão e empresas de projeto e consultoria
- Falta de visão dos tomadores de decisão acerca dos benefícios das ETEs sustentáveis
- Falta de conhecimento sobre a aceitação pública
- Comodismo pela facilidade de manter-se em inércia com a atual situação

É evidente que alterações estão ocorrendo em nosso planeta e a busca pela mudança de paradigma da sociedade surge como uma maneira de mitigar os efeitos das ações do homem sobre o meio ambiente. A busca por otimizações sustentáveis no tratamento de esgoto contribuem para o desenvolvimento sustentável e os avanços da economia circular em substituição ao modelo econômico atual.

Para Chernicharo (2021) a adoção do sistema econômico circular no tratamento de esgoto, pode contribuir para o alcance de diversas metas e objetivos. O Quadro 5 apresenta a relação entre as metas que podem ser alcançadas com a otimização e adoção de práticas sustentáveis nos processos de tratamento das ETEs, bem como seus respectivos ODS.

Quadro 5 Relação entre as metas e as otimizações sustentáveis em ETEs

ODS	Meta	Otimização sustentável
-----	------	------------------------

2- Fome zero e agricultura sustentável	2.4 Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo	Reaproveitamento do lodo e da espuma das ETEs na agricultura
6- Água potável e saneamento	<p>6.3 até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas, e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura em âmbito mundial</p> <p>6.a até 2030, ampliar a cooperação internacional e o apoio ao desenvolvimento de capacidades para os países em desenvolvimento em atividades e programas relacionados à água e ao saneamento, incluindo a coleta de água, a dessalinização, a eficiência no uso da água, o tratamento de afluentes, a reciclagem e as tecnologias de reuso</p>	<p>Atividade fim do presente trabalho</p> <p>Reaproveitamento do efluente final das ETEs como água de reuso</p>
7- Energia acessível e limpa	<p>7.a até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa</p> <p>7.2 até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global</p> <p>7.3 até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética</p>	<p>Reaproveitamento do biogás gerado em ETEs como fonte de energia</p> <p>Melhorar a eficiência energética da ETE</p> <p>Diversificar a matriz energética da ETE</p>
9- Indústria, Inovação e Infraestrutura	9.4 até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente adequados; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades	Otimização sustentável da ETE
11- Cidades e comunidades sustentáveis	11.3 até 2030, aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e a capacidade para o planejamento e a gestão participativa, integrada e sustentável dos assentamentos	O papel da ETE torna-se sustentável para integrar-se a estas comunidades
12- Consumo e produção responsáveis	12.4 até 2020, alcançar o manejo ambientalmente adequado dos produtos químicos e de todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionalmente acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar,	Intimamente ligado a questão da ETE tornar-se sustentável

	água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente	Gestão sustentável dos resíduos
	12.5 até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso	Reaproveitamento dos subprodutos

Fonte: autora, 2022.

4.7.1 Água de reuso

Segundo a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 54, de 28 de novembro de 2005, água de reuso é o “esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas”.

A utilização da água de reuso é uma prática que vem sendo difundida no mundo a anos, contribuindo para a diminuição dos problemas resultantes de escassez, má distribuição e má qualidade da água (MOTA; VON SPERLING, 2009). Segundo Rodriguez (2020), para cumprir com compromissos globais, deve-se abandonar a abordagem linear e se adaptar aos princípios de economia circular das águas de reuso, acarretando: (i) minimização dos rejeitos e contaminação; (ii) maximização do uso de materiais e produtos dentro do sistema; (iii) regeneração dos sistemas naturais; (iv) promoção de sistemas sustentáveis, maximizando a eficiência do sistema e reduzindo de custos.

O Brasil não possui regulamentação e normatização técnica que garanta a qualidade e a segurança da reutilização quanto ao reuso de águas residuárias para contato primário ou consumo humano, no geral seguem-se padrões elaborados por instituições privadas e referências internacionais (ARAÚJO, 2020). No país, existem normatizações federais e estaduais quando a prática do reuso direto não potável da água.

A Resolução CNRH nº 54/2005, estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água, e dá outras providências. A resolução estabelece as seguintes modalidades de reuso não potável, conforme Figura 8.

Figura 8 Modalidades de reuso direto para fins não potáveis



Fonte: adaptado CNRH nº54/2005, 2005.

Uma das aplicações da água de reuso tem sido na construção civil, onde a água está presente em quase todos os processos desta indústria. Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), boa parte da água potável consumida no mundo é destinada ao setor, utilizando até 50% da água distribuída em áreas urbanas. A substituição da água potável por fontes alternativas pode gerar uma economia de 10 a 20%, segundo a CBSC (ARAÚJO, 2020) Segundo Pinheiro (2002), a parcela de consumo de água nos países industrializados para o uso na construção civil é de 25%.

A água na construção civil pode ser utilizada como componente ou como ferramenta. Como componente, é utilizada na produção de concreto, argamassa e compactação de aterros. Como ferramenta, é utilizada nos serviços de limpeza, resfriamento e cura do concreto (NETO, 2008). Além disso, utilizam-se grandes quantidades de água potável para lavar os caminhões e betoneiras, bombas de concreto, equipamentos, agregados e cura. (PEREIRA, 2018).

4.7.3 Lodo desaguado

4.7.3.1 Reaproveitamento agrícola

Uma alternativa para a disposição final do lodo é o seu reaproveitamento como insumo agrícola, que agrega grande quantidade de macro e micronutrientes benéficos para as culturas, além de fornecer nutrientes e matéria orgânica ao solo (INCT ETEs Sustentáveis, 2022). É uma opção de baixo custo e impacto ambiental positivo, que se seguido dentro dos critérios seguros e ambientalmente corretos, torna-se uma das soluções mais benéficas a reciclagem dos nutrientes, colaborando para o fechamento do ciclo dos elementos (FERREIRA; ANDREOLI, 1999).

A fim de oferecer maior segurança em sua utilização, o lodo precisa passar pelos processos de digestão anaeróbia, calagem ou compostagem, que podem melhorar suas características físico-químicas. Nele são encontradas grandes quantidades de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e micronutrientes (PEREIRA, 2015). Não são todos os tipos de lodo que podem ser utilizados para disposição no solo, alguns necessitam de regulagem nos teores de potássio, cálcio e magnésio (OLIVEIRA et al., 2018).

Grandes benefícios foram percebidos com a prática agrônômica, como a redução de custos e danos ambientais, diminuição da necessidade de adição de fertilizantes químicos, reciclagem de nutrientes, aumento das atividades biológicas do solo, melhoria nas propriedades físicas e químicas, aumento da resistência do solo à erosão, culturas mais resistentes a seca e redução da emissão de CO₂ causada pela incineração (OLIVEIRA et al., 2018; PEREIRA, 2015).

As principais preocupações quanto sua utilização são a quantidade de poluentes orgânicos, micro-organismos persistentes e metais pesados presentes no lodo. Este último, por meio de reações complexas com o solo, pode levar à contaminação do ambiente e a entrada dos metais na cadeia alimentar, contaminando pessoas e seres humanos.

A aplicação do lodo proveniente de sistemas de tratamento de esgotos no solo não é um processo simples, em virtude da grande variabilidade de composições e complexidade dos diferentes tipos de solos (RICCI et al., 2010). Por isso, para alcançar a máxima produtividade agrícola das culturas fertilizadas, sem que haja riscos sanitários e ambientais, é necessário que estudos se dediquem ao aprimoramento das técnicas de higienização e definição de doses de referência a serem aplicadas (INCT ETEs sustentáveis, 2022).

4.7.3.2 *Recuperação de áreas degradadas*

A recuperação de áreas degradadas é outra alternativa ambientalmente positiva para a reutilização de lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto.

Primeiramente, áreas degradadas são ambientes que sofreram algum grau de perturbação em sua integridade e tiveram suas características físico-químicas e

biológicas originais alteradas, além de seus limites de recuperação naturais dos solos. A principal característica destas áreas são a alta deficiência de matéria orgânica, nutrientes e atividade biológica do solo (ANDREOLI, 2006).

Dentre as principais causas que podem provocar a degradação, pode-se citar o manejo inadequado da terra e da cobertura vegetal nas atividades agropecuárias, desmatamento, uso indiscriminado de agrotóxicos e fogo, irrigação inadequada, desenvolvimento urbano e atividades envolvidas na exploração mineral. A degradação ainda pode ser agravada pelos processos erosivos, de exposição à ação das chuvas, compactação, salinização e acidificação (ANDREOLI, 2006).

“O processo de recuperação de solos de áreas degradadas é lento” (SAMPAIO *et al.*, 2012, pag. 1638) e deve ter como objetivo a recuperação da integridade de sua estrutura física, química e biológica, além da recuperação produtiva, seja para produção de bens de consumo e matérias-primas ou na prestação de serviços ambientais (ANDREOLI, 2006).

A aplicação do biossólido aumenta o teor de matéria orgânica, a capacidade de troca iônica e a concentração de nutrientes no solo (METCALF; EDDY, 2016), além de reestabelecer parâmetros como baixa densidade, porosidade, aeração e capacidade de retenção e infiltração da água (SAMPAIO *et al.*, 2012). A melhora das propriedades físico-químicas proporciona condições favoráveis para o restabelecimento de comunidades biológicas (ANDREOLI, 2006).

4.7.3.3 *Fabricação de agregados leves*

A construção civil é um ramo da indústria que consome grande quantidade de recursos naturais, contribuindo para o esgotamento dos mesmos, ao mesmo tempo que demonstra sinais positivos de que pode tornar-se responsável pela incorporação de resíduos gerados (PODKOWA, 2015). Estudos vem sendo realizados a fim de desenvolver materiais a partir de lodos provenientes do tratamento de esgoto e a produção de agregado leve vem destacando-se como uma das melhores alternativas (SOUZA *et al.*, 2019). “A composição básica da fração inorgânica, silício, alumínio e, eventualmente cálcio é a mesma da maioria dos materiais de construção largamente consumidos e produzidos por processos térmicos, como produtos cerâmicos e cimentos” (SANTOS; JOHN, 2007, pag. 7)

“Agregados leves são adições de escórias de alto forno, argilas e outros materiais que ajudam a dar volume e podem melhorar as propriedades de tijolos e outros produtos como concretos para indústria civil” (OLIVEIRA, 2018).

O Brasil foi um dos pioneiros mundiais na utilização de lodos de esgoto como matéria prima na produção de agregados leves para construção civil. Foi em 1974 que a SABESP solicitou ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) um estudo a respeito do assunto. O lodo digerido era proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos de Pinheiros e o resultado obtido foi um material que pós britagem classificou-se dentro das especificações de agregado leve para fins de construção civil, com emprego em

estruturas de concreto, isolamento térmico, enchimento de vazios, pré-fabricação de edifícios e blocos para alvenaria e pisos. Uma empresa semi industrial operou de 1979 a 1982 (SANTOS; JOHN, 2007).

O processo de produção contempla as seguintes etapas: Desidratação do lodo, pós-secagem do lodo centrifugado, dosagem e mistura dos componentes, pelotização, secagem das pelotas por leito fluidizado, sinterização, quebramento e britagem do sínter e estabilização e classificação do sínter (OLIVEIRA, 2018).

4.7.3.4 *Fabricação de Cimento Portland*

Outra alternativa de aplicação do lodo produzido é na fórmula de cimentos Portland que tem como matérias-primas principais a pedra calcária e a argila (OLIVEIRA, 2018).

O principal componente do cimento é o clínquer Portland, obtido por meio da queima de da rocha calcária e o principal responsável pela emissão de dióxido de carbono no processo de fabricação do cimento Portland é a calcinação desde calcário, pois a cada 1.000 kg de calcina ($CaCO_3$) calcinada são gerados 560 kg de CaO e 440 kg de CO_2 . A reação química de calcinação é responsável por aproximadamente 52% das emissões de CO_2 no processo de fabricação do clínquer, enquanto o consumo de energia corresponde ao restante. Levando em consideração o consumo de energia, tem-se que a cada 1.000 kg de clínquer fabricados gera-se um média aproximadamente 815kg de CO_2 no processo de fabricação (WORRELL et al., 2001).

Em um estudo realizado por Tay e Show (1991) procurou desenvolver um cimento Portland, substituindo a argila por tortas de lodo.

Após a mistura com porcentagens distintas e diferentes temperaturas de queima, obteve-se melhor resultado com a mistura de 50% de lodo seco e 50% de pedra calcária, com temperatura de queima de 1.000°C e tempo de residência no forno de 4 horas. Esta composição química apresentou conformidade com as faixas de variação de um cimento convencional, com exceção do CaO e o SO_3 , que ficaram abaixo e acima dos padrões, respectivamente. O teor de CaO influencia na resistência e o teor de SO_3 na durabilidade do concreto. Apesar das deficiências encontradas, concluiu-se que como uma alternativa de reuso (SANTOS; JOHN, 2007).

O processo de produção contemplou as seguintes etapas: Secagem da torta de lodo a uma temperatura de 105 °C, moagem da torta desidratada, mistura com pó de pedra calcária e incineração (OLIVEIRA, 2018).

Assim, alternativas que fazem uso de processos térmicos eliminam micro-organismos enquanto geram energia neutra em termos de contribuição ao efeito estufa, desta forma, alternativas que exploram o poder calorífico e a fração inorgânica possuem esses benefícios (SANTOS; JOHN, 2007).

5 METODOLOGIA

O objetivo do presente trabalho foi propor alternativas sustentáveis para o efluente final e lodo gerados para a ETE Insular, localizada em Florianópolis – SC, a fim de tornar o processo de tratamento mais alinhado com os conceitos de ETES sustentáveis.

A metodologia adotada para a elaboração deste estudo baseou-se na exploração bibliográfica de documentos técnico-científicos, na análise dos parâmetros físico-químicos utilizados no monitoramento do processo de tratamento, bem como na avaliação *in loco* do sistema para a identificação dos principais subprodutos gerados. A partir desta avaliação, foi possível propor alternativas de uso e aplicação mais sustentáveis com o apoio do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

A Figura 9 representa o fluxograma de processos de elaboração do presente trabalho.

Figura 9 Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: autora, 2022.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A Estação de Tratamento de Esgoto Insular é operada pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), localizada em Florianópolis, Santa Catarina, próxima aos contornos das Pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles, no aterro da Baía Sul (Figura 10).

A ETE entrou em operação em 1997 e atualmente atende a população de 150 mil habitantes, com capacidade instalada de 296 L/s, contemplando a região central e as bacias da Agronômica, Trindade, Carvoeira, Pantanal, Saco dos Limões, Costeira do Pirajubaé e parte do Córrego Grande.

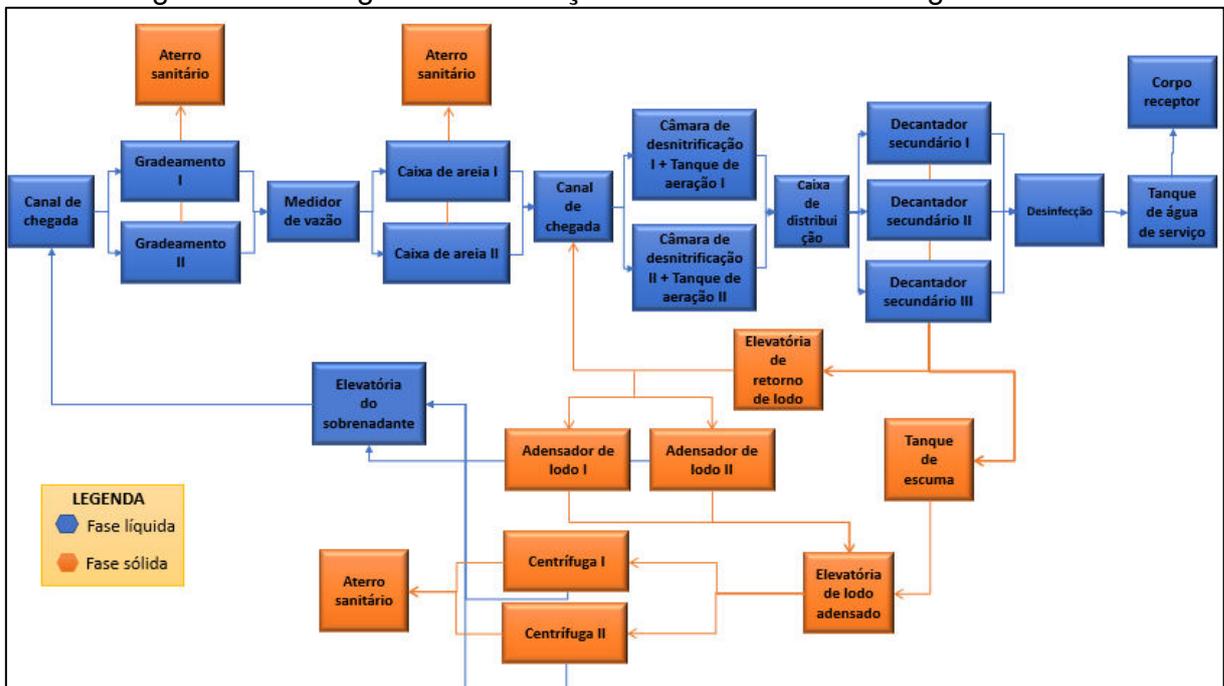
Figura 10: Estação de tratamento de esgoto Insular



Fonte: CASAN, 2020.

O processo de tratamento de efluentes é do tipo lodos ativados modalidade aeração prolongada, garantindo a eficiência máxima de 98% em termos remoção de DBO. O processo de tratamento da fase líquida é composto por tratamento preliminar, tratamento biológico, desinfecção e disposição oceânica por meio de emissário submarino. Já a fase sólida é adensada, acondicionada e desidratada, sendo destinada para um aterro sanitário licenciado, conforme fluxograma abaixo (Figura 11).

Figura 11: Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto Insular



Fonte: autora, 2022.

Ao entrar na estação, o esgoto é submetido ao tratamento preliminar composto por gradeamento mecanizado (Figura 12 (A) e (B)), medidor de vazão (Figura 12 (C)) e desarenadores (Figura 12 (D)). No tratamento da fase líquida, o efluente recém-chegado distribui-se em dois canais para que os sólidos grosseiros e flutuantes sejam retidos pelo sistema de gradeamento, composto por duas grades mecanizadas capazes de remover sólidos com diâmetros superiores a 10 mm. As grades são do tipo cremalheira, de barras retas, com mecanismo automatizado de acionamento do rastelo e correia transportadora para retirada dos detritos.

Em seguida, a vazão de entrada da estação é medida por meio de um medidor de vazão ultrassônico e o efluente é distribuído em 2 desarenadores distintos, com sistema mecanizado para a remoção da areia acumulada no fundo, composto por uma monovia, uma talha elétrica, com trole e guincho motorizados e uma caçamba do tipo *Clam shell*. Os desarenadores são limpos diariamente para retirada da areia sedimentada e da gordura que se acumula na superfície.

Figura 12: Unidades presentes no pré-tratamento



Fonte: autora, 2022.

Os sólidos grosseiros removidos no sistema de gradeamento são descarregados em uma correia transportadora, que por sua vez lança o material gradeado em uma caçamba estacionária (Figura 13), mesmo acondicionamento dado a areia e gordura retirados dos desarenadores. Ambos são encaminhados para o Centro de Gerenciamento de Resíduos de Blumenau, gerenciado pela Momento Engenharia Ambiental.

Figura 13 Caçambas estacionárias para retirada de detritos do pré-tratamento



Fonte: autora, 2022.

O tratamento biológico atual é constituído por duas câmaras de desnitrificação (Figura 14 (A)), dois tanques de aeração (Figura 14 (B)) e 3 decantadores secundários (Figura 14 (C)).

Figura 14 Unidades do tratamento biológico



Fonte: autora, 2022.

Após o tratamento preliminar, o efluente é distribuído em duas câmaras de desnitrificação equipadas com três conjuntos de misturadores submersíveis. Em seguida, o efluente em tratamento desloca-se para o reator biológico, composto por dois tanques de aeração, do tipo mistura completa, com volume útil de 9.216 m³ cada.

Cada tanque está equipado com 8 aeradores em cada, apoiados em plataformas de concreto. São aeradores de eixo vertical tipo fluxo misto, conforme Figura 15.

Figura 15: Aerador instalado



Fonte: autora, 2022.

Após a saída do efluente dos tanques de aeração, a caixa de distribuição, como o próprio nome já indica, distribui o líquido em 3 decantadores secundários, com volume útil de 2.035,75 m³. Os decantadores são equipados com removedor de lodo de tração periférica, dotado de raspadores de fundo do tipo parabólico e dispositivo removedor de espuma. O poço central do decantador está interligado ao poço de sucção das bombas de retorno de lodo, que por meio de uma canalização pressurizada, remove o lodo para recirculação e tratamento do excesso.

Por fim, a desinfecção do efluente ocorre por cloro gás, diluído em água e dosado nas calhas dos decantadores secundários. O efluente tratado segue para o tanque de água de serviço (TAS) e posteriormente é lançado na Baía Sul por meio de um emissário submarino com extensão estimada em 50 m.

O tratamento da fase sólida ocorre por meio do adensamento do lodo, seguido do acondicionamento com polímero catiônico e desaguamento por meio de centrífugas.

O lodo em excesso é encaminhado para 2 adensadores (Figura 16 (A)), cada um equipado com espessadores de lodo de acionamento central, em formato circular, com diâmetro interno igual a 19 m e altura igual a 3,5 m. O lodo adensado é recalcado para a elevatória de lodo adensado (Figura 16 (C)).

A espuma proveniente dos decantadores secundários é descartada para o tanque de espuma (Figura 16 (B)) e posteriormente também é recalcada para a elevatória de lodo adensado.

Figura 16 Unidades de tratamento da fase sólida



Fonte: autora, 2022.

O lodo adensado é acondicionado com polímero catiônico e pôr fim a desidratação ocorre utilizando centrífugas. No total são 2 equipamentos do modelo Decanter DC 15.000N Saturno II marca FAST, com vazão de 15 m³/h e motor de 40 cv. Com efeito da força centrífuga, as partículas sólidas acumulam-se na parede do tambor, as quais são transportadas pela correia até a caçamba.

O sistema de desaguamento de lodo produz uma “torta” com concentração de sólidos de aproximadamente 20%. O lodo é armazenado em caçambas de 30 m³ e encaminhado, assim como os resíduos do pré-tratamento, para o Centro de Gerenciamento de Resíduos de Blumenau.

O efluente líquido dos adensadores e das centrífugas retornam para o canal de chegada do tratamento preliminar por meio da elevatória de sobrenadante.

A Tabela 2 apresenta uma síntese com as informações relativas à estação.

Tabela 2 Síntese das informações relativas à ETE

Unidades	Dados
Volume útil de cada reator aeróbio	9.216 m ³
Quantidade de reatores aeróbios	3 (2 construídos e 1 em construção)
Volume útil de cada decantador	2.035,75 m ³
Número de unidades	4 (3 construídos e 1 em construção)
Volume útil de cada adensador de lodo	890,64 m ³
Diâmetro útil	19,00 m
Número de unidades	2

Fonte: autora, 2022.

A estação ainda possui prédios de apoio operacional, com guarita 24h, banheiros, vestiários, sala de descanso para os operadores, refeitório e subestação de energia.

No local ainda funcionam os escritórios de gerenciamento da parte operacional de esgoto de todas as estações de tratamento e elevatórias da Grande Florianópolis (SOMEG), equipe de redes de esgoto (SEOPE) e centro de controle operacional da superintendência regional metropolitana (CCO/Supervisorio). Além da oficina e almoxarifado da eletromecânica e laboratório de análises de efluentes da região.

Desde 2020, a ETE Insular passa por obras de ampliação e modernização do tratamento. O modelo atual de lodos ativados por aeração prolongada será substituído pelo processo MBBR. Desta forma, a estação passará a operar com sistema terciário, retendo nitrogênio e fósforo, além da matéria orgânica (CASAN, 2021b). O projeto prevê algumas intervenções para adequação no processo de tratamento, conforme *layout* geral (Figura 17).

Figura 17 Layout geral da ETE Insular após obras de manutenção e modernização



Fonte: adaptado Casan, 2019.

A obra tem prazo de execução de 42 meses e beneficiará, além dos citados acima, os bairros José Mendes e Morro da lagoa, permitindo que toda a rede coletora já instalada na Bacia do Itacorubi (Parque São Jorge, Jardim Anchieta, Córrego Grande e Pantanal) entre em operação.

O Quadro 6 apresenta uma comparação entre os parâmetros após a finalização das obras de ampliação e modernização.

Quadro 6 Comparação de parâmetros após obras de ampliação e modernização

Parâmetros	Antes	Depois
Tipo de tratamento	Lodos ativados modalidade aeração prolongada	MBBR
População atendida	150 mil habitantes	285 mil habitantes
Vazão média diária	296 L/s	417 L/s
Vazão máxima diária	417 L/s	612 L/s
Carga orgânica removida no sistema de tratamento	6.918 kg DBO ₅ /dia	10.377 kg DBO ₅ /dia
Carga orgânica remanescente no efluente tratado	288 kg DBO ₅ /dia	432 kg DBO ₅ /dia
Carga de nitrogênio orgânico total	1350 Kg TKN/dia	2025 Kg TKN/dia

Fonte: adaptado Governo de Santa Catarina, 2020.

5.2 DIAGNÓSTICO DA DESTINAÇÃO DOS PRODUTOS E SUBPRODUTOS DA ETE E CUSTOS

Para identificar a destinação final dos produtos e subprodutos gerados no processo de tratamento da ETE, foram necessárias 2 visitas *in loco* a fim de conhecer a rotina operacional da estação, identificar os subprodutos gerados ao final do processo e coletar dados necessários para o estudo.

A primeira visita ocorreu no dia 23 de janeiro de 2022 e foi acompanhada pelo operador da estação que estava de plantão e pela técnica em saneamento responsável pela estação. Nela foi possível conhecer a rotina operacional e cada unidade do tratamento individualmente. Foram feitos registros fotográficos, identificados os subprodutos gerados na ETE e algumas particularidades e adaptações realizadas por conta das obras que ocorrem no local.

A finalidade da segunda visita, realizada no dia 29/01/2022, foi de coletar os dados necessários para a elaboração do presente trabalho. A mesma ocorreu no escritório do setor operacional de esgoto, localizado na própria ETE e neste segundo momento, somente acompanhada pela técnica em saneamento responsável pela estação. O levantamento das informações foi realizado por diferentes meios, conforme descrição no Quadro 7.

Quadro 7 Coleta de informações sobre a ETE Insular

Ferramenta	Documento consultado	Informação extraída
Programa interno SIQ	Boletim de análise laboratorial	- Parâmetros físicos, químicos e biológicos do efluente final da estação no período compreendido entre 01/01/2019 e 31/12/2021

Programa interno BADOP	Relatório operacional mensal de esgoto	- Dados referentes ao volume tratado (m³), quantidade total de resíduos retirados (Kg) e quantidade total de lodo desaguado retirado (Kg), no período compreendido entre 01/01/2019 e 31/12/2021.
Arquivos internos do setor	Controle mensal de medição Relatório técnico do custo de operação das Estações de Tratamento de esgoto da SEM (2017)	- Dados relativos ao custo com coleta, transporte e destinação final do lodo centrifugado e material grosseiro retido no gradeamento e resíduos da caixa de areia. - Custos com produtos químicos - Custos com coleta, transporte e análise das amostras no laboratório de esgotos da SRM - Custo com a folha de pagamento integral dos funcionários que exercem função dentro da ETE - Custos de zeladoria e vigilância - Custos com manutenção em contrato como caminhões hidrovácuo
Arquivos internos da empresa	Projeto em AutoCad e memorial descritivo da ETE	- Dados referentes a equipamentos instalados e dimensões das unidades de tratamento
Diálogo com os funcionários	-	- Coleta de informações complementares, especialmente a atuação da empresa terceirizada ASA na prestação de serviços referente a desobstrução de redes coletoras com caminhão hidrovácuo

Fonte: autora, 2022.

Ao final desta etapa, foi possível elaborar um diagnóstico operacional atual da ETE Insular, além de custos relativos ao processo e os subprodutos gerados durante toda a cadeia de tratamento do efluente bruto, determinando como foco do estudo o efluente final e o lodo desaguado.

5.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E BIOLÓGICAS

As características físicas, químicas e biológicas dependem de diversos fatores que afetam diretamente sua qualidade. O conhecimento dessas características faz-se necessário para a tomada de decisão sobre a melhor alternativa de reutilização sustentável.

5.3.1 Efluente final

Os resultados das análises físicas, químicas e biológicas foram disponibilizados pela CASAN, via relatório de análise laboratorial que possui informações como número da amostra, previsão de análise, ponto amostral, endereço do local de coleta e data de entrada no laboratório.

A coleta das amostras para análise dos parâmetros relativos ao efluente final da estação ocorre no TAS. Quanto à periodicidade das coletas, antes da pandemia da COVID-19 ocorriam semanalmente, já durante este período, as coletas passaram a ser realizadas quinzenalmente.

O Quadro 8 apresenta os parâmetros utilizados para o presente trabalho, a unidade de medição utilizada, a metodologia adotada em cada parâmetro e o limite de quantificação do método. Vale salientar que todas as metodologias de análise utilizadas seguiram as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Quadro 8 Parâmetros de análises do efluente final da ETE Insular

Parâmetro	Limite de Quantificação do Método	Metodologia
Turbidez (NTU)	-	SMEWW 2130 B
<i>Escherichia coli</i> (NPM/100 mL)	1.0 - 9.0E7	SMEWW 9223 B
STD (mg/L)	3.0 - 999999.0	SMEWW 2540 C (ADAPTADO)
pH	0.02 - 15.0	SMEWW 4500 H+ B
Cloro residual (mg/L)	0.1 - 8.0	SMEWW 4500 CIG
DQO (mg/L O ₂)	-	SMEWW 5220 D

Fonte: adaptado CASAN, 2022.

5.3.2 Lodo e espuma

A CASAN não realiza análises periódicas do lodo desidratado produzido, por isto, para a caracterização do lodo gerado na estação utilizou-se o trabalho produzido por Silva (2013).

A caracterização foi dividida em duas etapas, a primeira, denominada de *básica* analisou parâmetros físicos, como pH, umidade, sólidos totais, voláteis e fixos. Sendo realizada no Laboratório Integrado de Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. A segunda etapa, chamada de *detalhada*, analisou os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos.

As coletas seguiram a recomendação da Resolução CONAMA nº 375/06 sobre uso do lodo na agricultura. Realizaram-se coletas sazonais, ao longo do período de um ano. Foram coletadas 5 amostras para a análise dos parâmetros físico-químicos, sendo uma a cada estação do ano e a quinta ao final para a análise de *Salmonella sp.* e ovos viáveis de helmintos. Para as demais análises microbiológicas e

parasitológicas foram coletadas 10 amostras no período de 3 meses. Os parâmetros físico-químicos e biológicos foram analisados pelos laboratórios da Universidade de Extremo Sul Catarinense (UNESC) situada em Criciúma e pela ECONSULTING Laboratório e Gestão Ambiental.

Na coleta foram retiradas partes distintas de amostras da caçamba e misturadas no final da coleta para que a mesma apresentasse grande homogeneidade, totalizando 1 kg. A amostra foi acondicionada em uma caixa de isopor com temperatura interna de 4°C e enviada para a análise nos respectivos laboratórios.

O Quadro 9 apresenta os parâmetros analisados e a metodologia utilizada.

Quadro 9 Parâmetros físico-químicos analisados e metodologia utilizada

Parâmetros Físico-Químicos	Metodologia Utilizada
Teor de sólidos voláteis	Gravimétrico
Zinco (Zn)	Espectrofotometria de Absorção Atômica
Cobre (Cu)	Espectrofotometria de Absorção Atômica
Bário (Ba)	Espectrofotometria de Absorção Atômica
Níquel (Ni)	Espectrofotometria de Absorção Atômica
Cádmio (Cd)	Espectrofotometria de Absorção Atômica
Cromo (Cr)	Espectrofotometria de Absorção Atômica
Selênio (Se)	Forno Grafite
Molibdênio (Mo)	Forno Grafite
Arsênio (As)	Forno Grafite
Mercúrio (Hg)	Vapor frio
<i>Escherichia Coli</i>	Tubos Múltiplos
Ovos de Helminthos viáveis	Deteção, enumeração, viabilidade

Fonte: adaptado Silva (2013).

5.4 LEGISLAÇÃO

5.4.1 Efluente final

Utilizou-se como base legal para o presente trabalho a ABNT NBR – 13.969/97: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação que considera que o esgoto de

origem essencialmente doméstica ou com características similares, depois de tratado, pode ser reutilizado para fins que exijam qualidade de água não potável, mas sanitariamente seguros. A norma ainda define os valores dos parâmetros da qualidade da água para reuso conforme a Classe (Tabela 3) e enquadra os usos preponderantes conforme a classificação (Quadro 10 Classificação dos usos preponderantes conforme a Classe).

Tabela 3 Parâmetros e valores da qualidade da água de reuso

Parâmetro	Unidade	Classe			
		1	2	3	4
Turbidez	NTU	<5	<5	<10	-
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	<200	<500	<500	<5.000
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	<200	-	-	-
pH	-	6,0-8,0	-	-	-
Cloro residual	mg/L	0,5 a 1,5	>0,5	-	-
Oxigênio Dissolvido	mg/L	-	-	-	2,0

Fonte: ABNT NBR 13.969, 1997.

Quadro 10 Classificação dos usos preponderantes conforme a Classe

Classe	Usos preponderantes
1	<ul style="list-style-type: none"> Lavação de carros; Outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possíveis aspirações de aerossóis pelo operador incluindo chafarizes.
2	<ul style="list-style-type: none"> Lavagem de pisos, calçadas e irrigação dos jardins; Manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticas, exceto chafarizes.
3	<ul style="list-style-type: none"> Reuso nas descargas dos vasos sanitários
4	<ul style="list-style-type: none"> Reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagem para gado; e Outros cultivos através de escoamento superficial ou sistema de irrigação pontual.

Fonte: ABNT NBR 13.969 (1997)

Organizou-se de forma comparativa, em forma de tabela, a média calculada a partir das análises realizadas pela CASAN e os valores dos parâmetros definidos na ABNT NBR 13.969/1997 com o intuito de enquadrar o efluente nas classes 1, 2, 3 e 4 conforme a mesma norma e analisar as possíveis formas de reuso secundário dentro e fora da estação de tratamento.

Além disso, foi realizada outra comparação entre as médias das análises fornecidas com a Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes e a Resolução CONSEMA nº 182, de 06 de agosto de 2021 que estabelece as diretrizes para os padrões de lançamento de esgotos domésticos de sistemas de tratamento públicos e privados, a fim de verificar se o efluente se encontra dentro dos padrões de lançamento no corpo receptor.

5.4.2 Lodo e espuma

No Brasil, a Resolução CONAMA N° 375, de 29 de agosto de 2006 define os critérios e procedimentos para utilização do lodo produzido em estações de tratamento de esgotos para fins agrícolas e produtos derivados. A resolução define as concentrações máximas admissíveis para os critérios físico-químicos e microbiológicos, conforme Tabela 4 e Tabela 5, além de limitações de uso e orientações para projetos de uso de lodo.

Tabela 4 Concentrações máximas admissíveis para substâncias inorgânicas

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Crômio	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800
Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <103 NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos <0,25 ovo/g de ST
	Salmonella ausente em 10g de ST
	Vírus <0,25 UFP ou UFF/g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <106 NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos <10 ovos/g de ST

Fonte: CONAMA, 2006.

Esta resolução caracteriza o lodo de esgoto ou produtos derivados em duas classes:

- Classe A: poderão ser utilizados para quaisquer culturas (respeitadas algumas restrições);

- Classe B: utilização restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação (respeitadas algumas restrições).

Tabela 5 Concentrações máximas admissíveis de patógenos

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <10 ³ NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos <0,25 ovo/g de ST
	Salmonella ausente em 10g de ST
	Vírus <0,25 UFP ou UFF/g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <10 ⁶ NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos <10 ovos/g de ST

ST: sólidos totais; NMP: Número mais provável; UFF: Unidade formadora de foco; UFP: Unidade formadora de placa

Fonte: CONAMA, 2006.

Segundo a resolução, decorridos 5 anos a partir da data de publicação, somente seriam permitidas as aplicações de lodo de esgoto ou produto derivado de classe A, exceto pelo surgimento de novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de riscos e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrassem a segurança do uso do lodo de esgoto Classe B. Por este motivo, consideraram-se as concentrações máximas de patógenos da Classe A para as comparações.

5.5 LEVANTAMENTO DAS PROPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL

5.5.1 Efluente final

A localização da ETE foi o fator decisivo para a escolha das alternativas de reaproveitamento do efluente final gerado, pois a estação está inserida em uma área urbanizada e com grande densidade populacional. Além disso, encontra-se perto de cartões postais da cidade e bairros de alto padrão. Assim, priorizou-se o reuso direto para fins não potáveis urbanos.

Fatores que influenciaram na escolha das alternativas de reaproveitamento do efluente final dentro de ambiente urbano foram:

- Viabilidade técnica preliminar;
- Distâncias entre o ponto de oferta e os possíveis usuários;
- Volume ofertado pela ETE;
- Transporte da água de reuso por caminhões;
- Aceitabilidade pública;

- Graus de impacto ao ambiente;
- Saúde pública.

Trennepohl (2018) em seu trabalho, identificou potenciais usuários dispostos a utilizar a água de reuso nas atividades, conforme os requisitos de qualidade definidos com base na pesquisa para o reuso urbano não potável. Utilizou-se este trabalho como referência base e realizaram-se levantamentos complementares para a construção da tabela de potenciais usuários.

A proposta almeja utilizar o recurso disponível, que é o efluente tratado pela ETE Insular, como fonte alternativa de água para reuso urbano não potável, já que atualmente, apenas uma pequena parcela é aproveitada nas atividades operacionais do tratamento na própria estação e o restante é descartado na Baía Sul.

5.5.2 Lodo e espuma

Para a determinação das potenciais alternativas de reuso utilizou-se como referência principal o trabalho realizado por Oliveira *et al* (2018). No total foram utilizados 3 livros, 10 artigos, 3 teses e 1 trabalho sobre o reaproveitamento deste subproduto em questão e as alternativas mais citadas foram as selecionadas para este estudo.

Além disso, fatores que influenciaram na escolha das alternativas de reaproveitamento do lodo produzido na ETE foram:

- Custos relativos à implantação, manutenção e operação;
- Viabilidade técnica preliminar;
- Volume de lodo produzido;
- Aceitabilidade pública;
- Graus de impacto ao ambiente;
- Saúde pública.

5.6 HIERARQUIZAÇÃO DAS PROPOSTAS

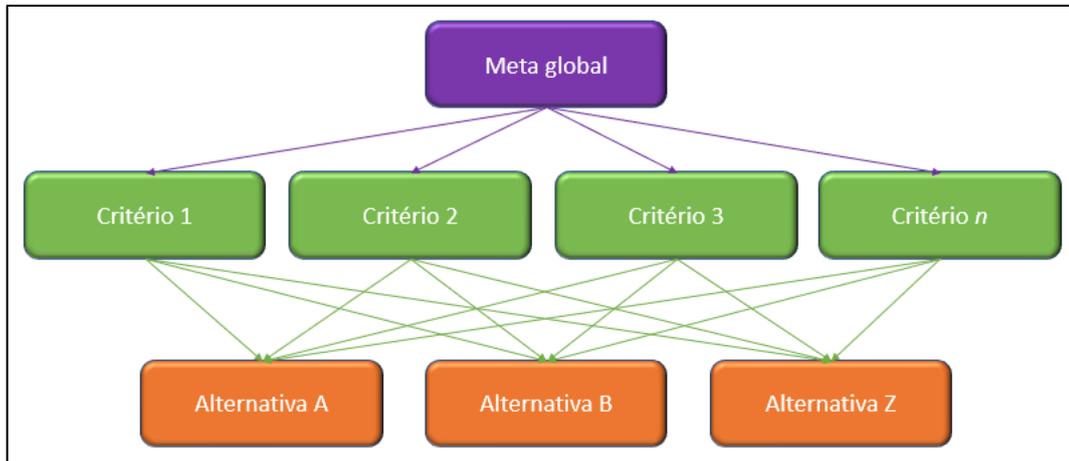
A escolha do método AHP foi motivada, principalmente, pelo fato deste permitir a estruturação de forma hierárquica do problema, utilizando a mensuração de critérios qualitativos e ordenação dos elementos em função de sua relevância para o alcance do objetivo principal. Além disso, o método mostrou-se ser de fácil compreensão e operacionalização.

A sequência metodológica adotada para hierarquização das melhores alternativas de reutilização do efluente final como água de reuso e do lodo e espuma gerados na estação para outras finalidades foi a mesma.

5.6.1 Estruturação do problema

Primeiramente, dividiu-se o problema em níveis hierárquicos, determinando de forma clara o objetivo/meta global a ser alcançada, em seguida, determinaram-se os critérios necessários para alcançar a meta e por último um levantamento das alternativas disponíveis, conforme Figura 18: Estruturação hierárquica do problema.

Figura 18: Estruturação hierárquica do problema



Fonte: adaptado Saaty, 1999.

Após a estruturação do problema, conforme o método, reuniu-se um grupo de decisores composto por 4 membros da área técnica da empresa para a elaboração das comparações. Posteriormente, foram realizados os seguintes cálculos:

- **Prioridades de critérios:** importância de cada critério em relação à meta global.
- **Prioridades de alternativas:** importância de cada alternativa em relação a um critério específico.
- **Prioridades de alternativas globais:** As prioridades de critérios e as prioridades de alternativas são resultados intermediários utilizados para calcular as prioridades das alternativas globais. As prioridades das alternativas globais classificam as alternativas em relação a todos os critérios e, conseqüentemente, ao objetivo global.

5.6.2 Matriz de prioridades de critérios

Iniciaram-se os cálculos pela prioridade de critérios. A matriz de comparação dos critérios foi apresentada ao grupo de decisores, que por meio de comparações, par a par, atribuíram valores numéricos de relevância, segundo a escala Fundamental de Saaty, Quadro 11, a critérios qualitativos, de acordo com a preferência entre os elementos comparados. Desta forma, o juízo verbal transformou-se em uma escala

de valores numéricos, representado por um vetor de prioridade/peso de critério, calculado nas etapas seguintes.

Quadro 11 Escala fundamental de Saaty

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Igual importância entre as variáveis	As duas atividades contribuem igualmente ao objetivo final
3	Importância pequena de uma sobre a outra	Experiência e julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação a outra
5	Importância grande de uma sobre a outra	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação a outra
7	Importância essencial de uma sobre a outra	A evidência favorecendo uma atividade em relação a outra é da ordem mais alta possível
9	Importância absoluta de uma sobre a outra	A evidência favorecendo uma atividade em relação a outra é da ordem mais alta possível
2,4,6,8	Valores intermediários de importância	Quando há necessidade de compromisso

Fonte: adaptado Saaty, 1999.

5.6.3 Verificação da consistência da matriz

Após a comparação entre os elementos da tabela, adicionou-se uma linha na parte inferior da matriz com o intuito de somar os valores de cada uma das colunas. Em seguida, normalizou-se a matriz, dividindo o valor de cada célula pela soma de sua respectiva coluna. Com isto, calculou-se a média ponderada dos valores de cada critério a fim de determinar o vetor de prioridade/peso dos critérios, desta forma, definindo uma hierarquia de preferência entre os mesmos.

Posteriormente, foi necessário verificar se os julgamentos realizados pelos tomadores de decisão foram consistentes. Para tanto, realiza-se o cálculo da razão de consistência (CR), que seguiu a seguinte lógica.

Na matriz de prioridade de critérios, organizaram-se os vetores de prioridade/peso, calculados anteriormente, em forma de coluna. Assim, multiplicou-se cada valor presente na primeira coluna pela prioridade do primeiro critério, e assim, sucessivamente até o fim das colunas. Por meio da soma dos valores de cada linha, obteve-se um conjunto de vetores de soma ponderada. Então, dividiu-se os elementos desde vetor soma ponderada pela prioridade correspondente de cada critério, determinando a matriz de consistência. Calculou-se a média dos valores da etapa anterior, chamado de λ_{max} .

Deste modo, calculou-se o índice de consistência (CI) por meio da Equação 1.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Equação 1: Índice de consistência

Onde:

n= ordem da matriz

Por fim, calculou-se a razão de consistência (CR) por meio da Equação 2. CR compara o CI da matriz de julgamento, ao índice de consistência de uma matriz aleatória. Saaty fornece o valor calculado do RI para matrizes de diferentes tamanhos.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Equação 2: Taxa de consistência

Onde:

RI= índice randômicos de matrizes de ordem n

Tabela 6 Índice Randômico Médio do AHP

Ordem da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Saaty, 1999.

Se $CR \leq 0,1$ então a matriz é consistente e pode-se prosseguir para as demais etapas.

Se $CR \geq 0,1$, então a matriz é inconsistente, então a equipe de tomadores de decisão precisa reavaliar as comparações realizadas.

5.6.4 Matriz de prioridades de alternativas

Em seguida, calculou-se a matriz de prioridades de alternativas de forma semelhante a utilizada para o cálculo da matriz de prioridade de critérios. Foram construídas matrizes de comparação de alternativas para cada um dos critérios elencados e verificada a consistência de cada matriz.

5.6.5 Matriz de prioridade geral

Com todas as prioridades de alternativas calculadas e consistentes calculou-se a matriz final de prioridade das alternativas para os critérios avaliados, conhecida como matriz de prioridade geral.

Utilizou-se como ponto de partida a matriz com as prioridades de cada alternativa calculada. Em seguida, inseriu-se na matriz o vetor prioridade/peso de cada critério e multiplicaram-se as prioridades das alternativas pelos pesos dos critérios. Por fim, para obter as prioridades gerais, somaram-se os resultados das alternativas em relação a cada critério e foi possível hierarquizar as prioridades finais.

6 RESULTADOS

6.1 DIAGNÓSTICO OPERACIONAL E DESTINAÇÃO ATUAL DOS PRODUTOS E SUBPRODUTOS GERADOS

Após levantamento de dados realizado *in loco* e por meio de documentos operacionais, identificaram-se os subprodutos gerados no tratamento, bem como a destinação final atual e a quantidade total anual gerada entre os anos de 2019 e 2021. Os resultados são expostos no Tabela 7.

Tabela 7 Quantidade total gerada e destinação final dos subprodutos do tratamento gerados na ETE Insular

Produto/Subproduto	Destinação final atual	Quantidade total gerada		
		2019	2020	2021
Sólidos gradeados, areia e gordura (Kg)	Aterro sanitário	102.962	60.370	49.388
Lodo e espuma desaguados (Kg)	Aterro sanitário	9.414.340	11.344.551	10.687.570
Efluente final (m³)	Emissário submarino	8.767.884	8.593.937	10.001.339
Gases	Não possui coleta ou medição	-	-	-

Fonte: autora, 2022.

Por meio dos dados coletados, pode-se perceber que de 2019 até o final de 2021, houve uma queda significativa na quantidade total de resíduos gradeados retirados na ETE. Esta diminuição pode ser fruto das ações de melhoria operacionais que a CASAN implantou, tais como a instalação de cestas e grades a montante das elevatórias que fazem parte do sistema e que ainda não as tinham, além da limpeza diária das mesmas por funcionários da empresa. Iniciou-se também o vídeo monitoramento e limpeza das redes que chegam na estação. O conjunto dessas ações, pode ter contribuído para a queda de 52% no total retirado durante o período.

Já a quantidade de lodo e espuma tiveram um aumento considerável de 2019 para 2020. Isto por ter ocorrido em decorrência do fechamento de um dos tanques de aeração para reforma nas obras de modernização e ampliação que vem sendo realizadas há dois anos na ETE. Com esta alteração operacional, o sistema passou a operar como lodos ativados convencional e segundo Von Sperling (2018), um sistema convencional gera mais lodo do que um por aeração prolongada.

Quanto ao efluente final, houve um aumento de 16% no volume total tratado de 2020 para 2021.

Por tratar-se de um sistema aeróbio, há baixíssima produção de subprodutos na fase gasosa e a estação não possui sistema de coleta e tratamento do que é gerado, por este motivo, optou-se por trabalhar apenas com o efluente final e o lodo e espuma gerados no tratamento.

Os materiais sólidos gradeados e a areia removida do fundo da caixa de areia são os únicos produtos do tratamento projetado que exalam odores fétidos. Este problema foi minimizado com a instalação de tampas de aço nos canais do pré-tratamento e desarenadores, além de caçambas com tampas para acondicionamento e transporte desses materiais até o destino, em aterro. No local, há instalado um biofiltro para coleta e tratamento dos gases gerados no pré-tratamento, porém no dia da visita, o mesmo encontrava-se inativo por problemas operacionais. O projeto de ampliação e modernização prevê a construção de um novo biofiltro em substituição ao antigo.

Além disso, as alterações advindas destas obras, alterando a modalidade do tratamento de aeração prolongada para MBBR irá proporcionar melhorias ao tratamento, como o aumento da capacidade de tratamento utilizando a mesma área, simplicidade de operação, eliminação do descarte de lodo, dispensabilidade do descarte manual do lodo, eliminação da preocupação com a formação de lodos de difícil sedimentação, robustez para suportar variações nas vazões de pico, como por exemplo, períodos de chuva, além da diminuição na quantidade de lodo produzida.

Sabe-se que o reuso da água na área interna da unidade foi previsto no projeto original da ETE, sendo utilizada desde 1997, para fins não potáveis (TRENNEPOHL, 2018), conforme Figura 19.

Figura 19 Sistema de água de reuso instalado na ETE Insular



Fonte: autora, 2022.

O sistema instalado é composto por duas bombas, que mandam a água do tanque da água de serviço para um reservatório próximo à casa de cloro. Constatou-se que a quantidade de água armazenada é utilizada nos próprios processos operacionais da estação, tais como, limpeza do gradeamento instalado no pré-tratamento (Figura 20 (A)), limpeza do tanque de espuma (Figura 20 (B)), mistura do polímero catiônico utilizado na centrífuga (Figura 20 (C)) e diluição do cloro gasoso utilizado no processo de desinfecção.

Figura 20 Utilização da água de reuso nos procedimentos operacionais da ETE Insular



Fonte: autora, 2022.

Além disso, a água de reuso está sendo utilizada nas obras de ampliação e modernização da estação, na perfuração e colocação das estacas do novo tanque de aeração. A tecnologia que está sendo aplicada, conhecida como estaca raiz (Figura 21), utiliza grande quantidade de água como fluido de circulação no processo de perfuração (GEOFIX, 2022).

Figura 21 Perfuração do solo para colocação de estacas na obra de ampliação e modernização da ETE Insular



Fonte: CASAN, 2021c.

Infelizmente, a CASAN não gera fatura de consumo de água para a ETE Insular, por ser fornecedora própria. Desde forma, não foi possível estimar o volume de água potável consumida na estação.

6.2 CUSTOS ATRELADOS AO TRATAMENTO

6.2.1 Efluente final

Segundo relatório técnico de custo de operação das Estações de tratamento de esgoto da Superintendência Regional Metropolitana (SRM), os custos relativos a ETE Insular contemplam custos com coleta, transporte e destinação final do lodo centrifugado e material grosseiro retirado do pré-tratamento; custos com produtos químicos; custos com coleta, transporte e análise de amostras; custos com a folha de pagamento integral dos funcionários que exercem função dentro da ETE; custos com

porteiros, vigilantes e serviços gerais; e custos com manutenção de caminhões hidrovácuo.

O valor médio por volume tratado encontrado foi de R\$0,83 centavos/m³ em 2017. Assim, buscou-se atualizar o valor conforme variação acumulada relativa à inflação até dezembro de 2021. O percentual total do período foi de 25,03% (IBGE, 2022), resultando em R\$1,04 reais/m³. Os valores são expostos na Tabela 8 Estimativa de custos com o tratamento do efluente final - ETE Insular, Florianópolis/SC.

Tabela 8 Estimativa de custos com o tratamento do efluente final - ETE Insular, Florianópolis/SC

Variáveis	Valores
Custo médio por volume tratado em 2017	R\$0,83 m ³
Custo médio por volume tratado atualizado conforme inflação do período	R\$1,04 m ³
Volume médio de efluente tratado entre 2019 e 2021	9.121.053 m ³ /ano
Custo médio total por ano	R\$9.485.895,61

Fonte: autora, 2022.

Conforme exposto na Tabela 8, estima-se que a empresa gastou R\$9.485.895,61 reais por ano, totalizando R\$28.457.686,83 reais no tratamento do efluente entre os anos de 2019 e 2021.

6.2.2 Lodo e espuma

O custo com a atual alternativa de disposição final em aterro sanitário é composto por custos com coleta e transporte e custos com disposição final, com valores fixados em contrato. Os valores fornecidos pela empresa resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 Custos com a destinação final do lodo desaguado na ETE Insular, Florianópolis/SC

Variáveis	Valores
Custo com coleta e transporte	R\$0,60 T.km
Custo com disposição no aterro	R\$218,64 T de lodo desidratado

Fonte: autora, 2021.

O transporte é feito por caminhões com caçambas de volume igual a 10 m³. Os custos com a coleta e transporte são calculados de acordo com a massa de lodo desaguado e a distância percorrida da ETE até o aterro sanitário. O custo unitário com coleta e transporte foi calculado multiplicando a distância percorrida pelo custo com coleta e transporte. Os dados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 Custo relativo à coleta e o transporte do lodo desaguado na ETE Insular, Florianópolis/SC

Variáveis	Valores
Média da massa de lodo desaguado entre 2019 e 2021	R\$10.482,15 T/ano
Taxa de coleta e transporte	R\$0,60 T.km
Distância entre ETE e Aterro	179 km
Custo unitário de coleta e transporte	R\$107,4 T
Custo anual	R\$1.125.783,30

Fonte: autora, 2022.

Com a atual destinação final dada ao lodo desaguado, a empresa gastou em média R\$1.125.783,30 por ano, nos 3 últimos anos, apenas com a coleta e o transporte, totalizando, em média, um montante de R\$3.377.349,90 no período analisado.

Em seguida, calculou-se o valor gasto com disposição do lodo em aterro, segundo Tabela 11.

Tabela 11 Custo relativo à disposição final em aterro sanitário

Variáveis	Valores
Média da massa de lodo desaguado	R\$10.482,15 T/ano
Custo unitário de disposição no aterro	R\$218,64 T
Custo anual	R\$2.291.817,28 ano

Fonte: autora, 2022.

A atual solução fez com que a empresa desembolsasse aproximadamente R\$2.291.817,28 por ano, somente para a disposição do lodo no aterro.

Somando-se os custos anuais da atual solução, conclui-se que a empresa gastou R\$3.417.600,58 para a destinação dos lodos produzidos na ETE Insular.

Tabela 12 Custo total com para disposição do lodo gerado na ETE Insular, Florianópolis/SC

Variáveis	Valores	Percentual
Custo com coleta e transporte	R\$1.125.783,30 ano	32,94%
Custo com disposição no aterro	R\$2.291.817,28 ano	67,06%
Custo total	R\$3.417.600,58 ano	100%

Fonte: autora, 2022.

O custo com a coleta e o transporte representou 32,94% e o custo com a disposição final no aterro representou 67,06% do custo total da destinação final do lodo desaguado.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO E SUBPRODUTO

6.3.1 Efluente final

A caracterização do efluente final ocorreu em função da ABNT NBR 13.969/1997 com o intuito de enquadrar o efluente final em uma classe para reuso. Comparou-se o resultado das médias com a Resolução CONAMA 430/2011 que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes e Resolução CONSEMA 182/2021 que estabelece as diretrizes para os padrões de lançamento de esgotos domésticos de sistemas de tratamento públicos e privados em Santa Catarina.

A média foi calculada conforme os resultados das análises no período compreendido entre 2019 e 2021, exceto para os parâmetros de turbidez e STD que apresentaram valores apenas para o ano de 2019. Os dados são dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 Média dos resultados das análises do efluente final da ETE Insular, Florianópolis/SC.

Parâmetro	Média do período	CONAMA Nº 430/2011	CONSEMA Nº 182/2021	Classe			
				1	2	3	4
Turbidez (NTU)	15,20	-	-	<5	<5	<10	-
Escherichia coli (NPM/100 mL)	1,9E+5	-	PA*	<200	<500	<500	<5.000
STD (mg/L)	545,48	-	-	<200	-	-	-
pH	7,23	5,0 – 9,0	-	6,0 - 8,0	-	-	-
Cloro residual (mg/L)	0,37	-	-	0,5 a 1,5	> 0,5	-	-
OD (mg/L O2)	4,47	-	-	-	-	-	>2

*PA Parâmetro de acompanhamento

Fonte: autora, 2022.

Dentre os parâmetros acima, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece limites de lançamento apenas para o pH, sendo permitido o lançado entre 5,0 e 9,0. A média do efluente final foi igual a 7,23, estando dentro do exigido. Quanto à Resolução CONSEMA 182/2021, os parâmetros analisados neste estudo não possuem restrição na referida norma, apenas o parâmetro de *Escherichia coli* é citado, sendo considerado um parâmetro de acompanhamento. Desta forma, o efluente final da estação respeita estas normas.

Comparando as médias dos parâmetros com a NBR 13.969/1997, concluiu-se que:

- Turbidez= 15,2 NTU, não se encontra dentro dos limites estabelecidos para enquadramento nas classes 1, 2 e 3, podendo ser categorizada como classe 4

- STD= 545,4 mg/L, não se encontra dentro dos limites estabelecidos para classe 1, podendo ser enquadrado nas classes 2, 3 ou 4, que não possuem restrição de valores
- pH= 7,23, se encontra dentro dos limites estabelecidos para enquadramento na classe 1
- Cloro residual= 0,37 mg/L, não se encontra dentro dos limites estabelecidos para classe 1 e 2, apresentando um valor abaixo do mínimo exigido, podendo ser enquadrado nas classes 3 ou 4 que não possuem valores limites estabelecidos
- OD= 4,4 mg/L.O₂, possui valor acima do estabelecido para classe 4, podendo ser enquadrado nas classes 1, 2 e 3, que não possuem valores de restrição.
- *Escherichia coli*= 1,9E+5 NPM/100 mL, possui valor muito acima do permitido pela classe menos restritiva e não pode ser enquadrado em nenhuma das classes.

Com isto, pode-se concluir que o efluente final da estação pode ser enquadrado em 5 dos 6 parâmetros analisados, porém como o parâmetro de *Escherichia coli* encontra-se fora dos limites estabelecido pela ABNT NBR 13.969/1997, o efluente final da estação, com as atuais características, não pode ser utilizado como água de reuso.

É importante salientar que a opção de utilização como água de reuso não foi totalmente descartada. Para que a CASAN a utilize para este fim, é necessário o enquadramento do parâmetro que está em desacordo com a norma. Para que isto aconteça, pode-se sugerir que a empresa revise o atual processo de desinfecção e realize um estudo aprofundado quanto ao investimento em unidades complementares para este fim. Além disso, já estão sendo executadas obras de ampliação e modernização da estação, que irão contribuir de maneira positiva na melhora do tratamento e conseqüentemente na qualidade do efluente final, segundo o projeto apresentado.

6.3.2 Lodo e espuma

Os valores dos parâmetros analisados para a caracterização do lodo da estação foram retirados do trabalho desenvolvido por Silva (2013), o mais recente a realizar tal caracterização do lodo da ETE Insular. Vale ressaltar que as amostras das análises relativas a estes dados foram coletadas quando o lodo da estação era desidratado utilizando prensas mecânicas e atualmente a desidratação ocorre por centrífugas.

Para a caracterização detalhada, o material utilizado foi o lodo de esgoto pós desidratação. As médias dos parâmetros, o desvio padrão e os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 375/2006 para lodos de esgoto classe A são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Médias dos resultados das análises referente ao lodo pós desidratação da ETE Insular, Florianópolis/SC.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	CONAMA 375/2006- Classe A
Sólidos Voláteis (%ST) (mg/gm)	76,48	2,94	70
Arsênio (As) (mg/kg)	3,73	1,96	41
Bário (Ba) (mg/kg)	147,75	21,63	1300
Mercúrio (Hg) (mg/kg)	0,95	0,45	17
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	13,80	10,80	50
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,25	0,88	420
Selênio (Se) (mg/kg)	2,70	2,40	100
Cobre (Cu) (mg/kg)	198,00	21,00	1500
Zinco (Zn) (mg/kg)	521,8	26,56	2800
Cádmio (Cd) (mg/kg)	0,70	0,13	39
Chumbo (Pb) (mg/kg)	22,64	2,49	300
Cromo (Cr) (mg/kg)	37,52	20,19	1000
Coliformes Termotolerantes (NMP/g ST)	1,9E+08	4,91E+08	1,0E+3
Ovos Helmintos (viáveis ovos/g ST)	0,054	0,12	0,25
Salmonella sp. (g)	Ausente	-	10
Vírus	-	-	0,25

Fonte: adaptado Silva, 2013.

Pela Resolução CONAMA 375/2006, a relação SV/ST < 70% e o valor médio encontrado foi de 73,5 % ST, considerando o desvio padrão, um pouco acima do recomendado, isto significa que o lodo produzido na estação não se encontrava estabilizado. Segundo von Sperling (2018b), o lodo proveniente de estações de tratamento que operam por lodos ativados com modalidade aeração prolongada deveriam apresentar teor de SV/ST entre 65% e 70%. Como o valor apresentado encontra-se acima de 70% recomendado pela literatura, seria necessário um pós-tratamento para a estabilização do lodo ou a revisão do processo biológico da estação.

Já os parâmetros analisados para as substâncias inorgânicas, apresentaram valores dentro das concentrações máximas permitidas pela referida norma. O fato da ETE não receber contribuição de efluentes industriais, contribuiu para que as concentrações de metais pesados permaneçam abaixo do limite estabelecido.

Quanto aos valores relativos a agentes patogênicos, somente o parâmetro de coliformes termotolerantes apresentou valores acima da concentração permitida para lodos de esgoto tipo classe A. Este fato pode ter sido consequência do lodo não estar estabilizado.

6.4 PROPOSTAS DE USOS SUSTENTÁVEIS

6.4.1 Água de reuso

O levantamento das alternativas para o reuso do efluente final da estação teve como base o trabalho desenvolvido por Trennepohl (2018) que identificou potenciais usuários dispostos a utilizar a água de reuso gerada na ETE Insular em suas atividades (Quadro 12), conforme os requisitos de qualidade definidos com base na legislação para o reuso urbano não potável.

Quadro 12 Potenciais usuários para utilização da água de reuso produzida na ETE Insular, Florianópolis/SC

Potenciais usuários	Finalidades	Aspectos quantitativos
COMCAP (Companhia de Melhoramentos da Capital)	Lavação de pátio	36.900 L/semana
	Lavação de ruas e calçadas da área central	30.000 L/semana
FLORAM (Fundação Municipal do Meio Ambiente)	Irrigação e limpeza de áreas públicas, especialmente no verão	30.000 L/semana
CBMSC (Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina)	Exercícios de combate a incêndios e incêndios em áreas urbanas e/ou florestais	60.000 L/semana
Empresa terceirizada (ASA – CASAN)	Limpeza e desobstrução de redes coletoras de esgoto, além serviços em outras ETEs	116.000 L/semana a 426.000 L/semana

Fonte: adaptado Trennepohl, 2018.

Além das propostas levantadas pelo autor, agregou-se também como possível usuária a empresa terceirizada que presta serviços para CASAN, que no momento é a ASA Prestadora de Serviço contratada para atender serviços referentes à desobstrução de redes coletoras de esgoto, serviços operacionais em ETEs, limpeza em estações elevatórias de esgoto, limpeza do gradeamento de elevatórias de grande porte e limpezas internas e externas de vias que sejam de responsabilidade da CASAN, com auxílio de caminhões hidrovácuo.

A empresa possui 7 caminhões à disposição, sendo 6 deles com capacidade de armazenamento médio de 2 m³ de água e 1 com capacidade de armazenamento de 10 m³. Todos trabalham em horário comercial os 5 dias da semana. Aos sábados, trabalham 2 caminhões e aos domingos 1 caminhão fica à disposição. Segundo o coordenador de serviços da terceirizada, geralmente é necessário reabastecer cada caminhão no máximo 3 vezes por dia, dependendo do serviço realizado. Atualmente utiliza-se água potável para a realização dos serviços.

Sendo assim, para o cálculo do consumo médio desta alternativa, presumiram-se dois cenários:

Quadro 13 Possíveis cenários de consumo utilizada pela ASA Prestadora de serviços

Cenário 1	<ul style="list-style-type: none"> - Todos os caminhões trabalhando durante a semana - Os 3 caminhões que trabalham durante o final de semana possuem capacidade de armazenamento de 2 m³ - Todos os caminhões são abastecidos apenas 1 vez durante o dia 	Volume consumido igual a 116.000 L/semana
Cenário 2	<ul style="list-style-type: none"> - Todos os caminhões trabalhando durante a semana - No sábado trabalha 1 caminhão com capacidade de armazenamento de 10 m³ e outro com 2 m² - No domingo trabalha o caminhão com capacidade de armazenamento de 10 m³ - Todos os caminhões são abastecidos 3 vezes durante o dia 	Volume consumido igual a 426.000 L/semana

Fonte: autora, 2022.

Assim, definiu-se as seguintes alternativas para o reuso do efluente final da ETE Insular no Quadro 14, juntamente com a finalidade principal, órgão responsável, classe de enquadramento necessária e logística de distribuição.

Quadro 14 Alternativas para reuso do efluente final da ETE Insular, Florianópolis/SC

Órgão responsável	Finalidade	Classe	Logística de distribuição
COMCAP (Companhia de Melhoramentos da Capital)	Lavação de ruas e calçadas da área central e lavação do pátio da empresa	2	Caminhões dos órgãos responsáveis abastecem na ETE Insular
FLORAN (Fundação Municipal do Meio Ambiente)	Irrigação de áreas verdes na área central	2	
CBMSC (Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina)	Exercício de combate a incêndios e incêndios em áreas urbanas e/ou florestais	1	
Empresa terceirizada que presta serviço para a CASAN (no momento é a ASA Prestadora de serviços)	Limpeza e desobstrução de redes coletoras de esgoto	3	

Fonte: autora, 2022.

6.4.2 Lodo e espuma

O levantamento das alternativas de reutilização do lodo e da espuma produzidos na ETE foi realizado por meio de pesquisas bibliográficas e experiências de sucessos no Brasil.

O Quadro 15 apresenta o levantamento das alternativas selecionadas e quantidade de referências citadas para cada uma delas.

Quadro 15 Alternativas para reutilização do lodo desaguado produzido na ETE Insular, Florianópolis/SC

Alternativa de reutilização	Quantidade
Reaproveitamento agrícola	17
Recuperação de solos degradados	15
Reaproveitamento na construção civil como agregado leve	10
Produção de cimento Portland	8

Fonte: Autora, 2022.

6.5 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

A seguir, serão apresentados a estrutura da problemática, os critérios selecionados para o julgamento das aplicações e os resultados obtidos após a aplicação. A identificação das variáveis que modelaram o problema foi realizada com o intuito de mapear as necessidades da organização e verificar as prioridades da empresa.

6.5.1 Água de reuso

Para a maior clareza, definiu-se a meta global da análise como: Melhor alternativa para a utilização do efluente final como água de reuso direto para fins não potáveis e determinaram-se os critérios utilizados para a hierarquização (Quadro 16).

Quadro 16 Critérios selecionados para a aplicação do método AHP na seleção da melhor alternativa de reuso do efluente final

CRITÉRIOS	
C1	Benefícios para a empresa
C2	Custos com ampliação, manutenção e operação
C3	Risco de contaminação
C4	Benefício ambiental
C5	Prejuízo ambiental

Fonte: autora, 2022.

A descrição dos critérios segue abaixo:

Benefício da empresa (C1): Critério que leva em consideração os benefícios que a utilização da água de reuso proporciona para a empresa. O reuso pode contribuir para diminuição do consumo de água potável e conseqüentemente pode trazer benefícios econômicos para a empresa, uma vez que o volume que seria utilizado para fins menos nobres, passa a ficar disponível para fornecimento dos demais usuários, que pagarão por este bem, gerando economia com gastos relativos a potabilização da água bruta e até mesmo o tratamento do efluente que passa a ser reutilizado e não apenas descartado. Com a consolidação deste novo produto, a companhia poderia até mesmo vendê-la a taxas menores para promover a prática e diminuir os custos com o tratamento. Utilizar a água de reuso, contribui também para que a empresa economize um volume maior de água em épocas de estiagem, evitando a pressão sobre os mananciais utilizados e possíveis gastos na busca por alternativas paralelas de abastecimento da população. Além de contribuir de maneira positiva para a imagem da empresa.

Custos com ampliação, manutenção e operação (C2): São os custos relativos a adaptações e ampliações estruturais do sistema de reuso já existente na ETE Insular, para distribuição aos potenciais usuários, além de análises químicas periódicas para garantir a qualidade da água disponibilizada, energia elétrica envolvida em todas as etapas, mão de obra e manutenções como limpeza do sistema, equipamentos elétricos, mecânicos, tubulações e rede de distribuição. Além da implantação de etapas de tratamento adicionais pelos quais o efluente precisará passar para poder enquadrar-se na classe correta e assim, tornar-se apto a utilização na proposta de uso preponderante.

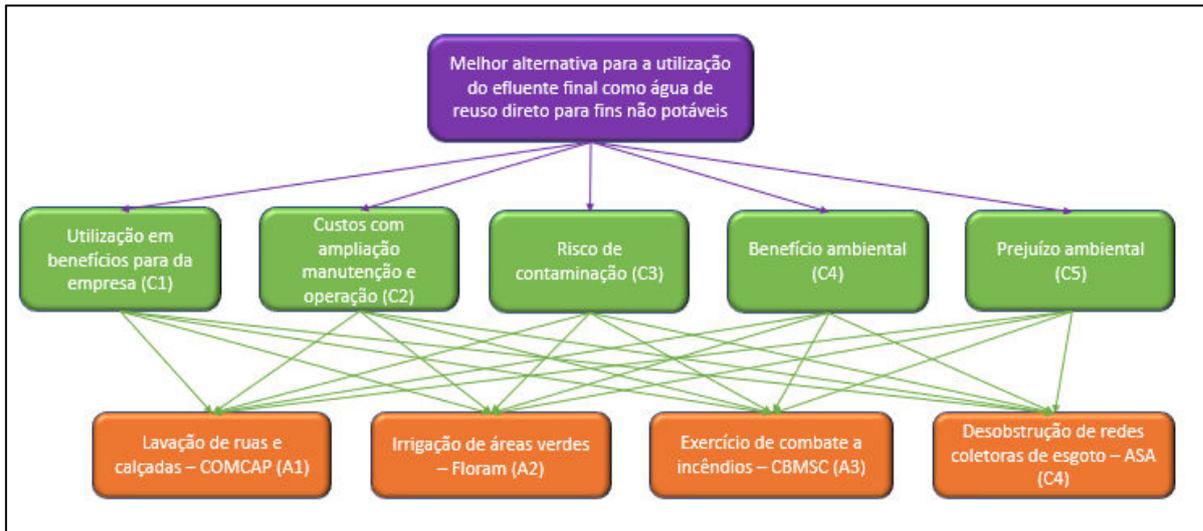
Risco de contaminação (C3): É o risco potencial de contaminação dos usuários e da sociedade de maneira geral, caso ocorra o contato direto da água de reuso com as pessoas, seja pela falta de equipamentos de proteção individual ou possibilidade de ingestão acidental por meio de gotículas que poderão ser inaladas devido a formação de aerossóis.

Benefício ambiental (C4): A utilização da água de reuso acarreta inúmeros benefícios para o meio ambiente, tais como a economia da água potável para a utilização em fins mais nobres, diminuição da pressão sobre os recursos naturais, conservação da qualidade dos corpos da água, evitando contaminação, excesso de nutrientes e eutrofização.

Prejuízo ambiental (C5): São as alterações ambientais que poderão ocorrer devido a disposição de água de reuso no meio ambiente, tais como contaminação do solo, dos corpos hídricos, da fauna e flora. São o conjunto de danos possíveis ao meio ambiente que contribuam para alterações físicas, químicas e biológicas do ecossistema que entrará em contato com o efluente tratado.

Com a meta global e os critérios definidos, elaborou-se a estrutura da problemática, confirme Figura 22.

Figura 22 Estrutura para hierarquização pelo método AHP da melhor alternativa de reutilização do efluente final como água de reuso da ETE Insular, Florianópolis/SC.



Fonte: Autora, 2022.

Iniciou-se com a elaboração da matriz dos critérios e a determinação das prioridades da empresa, construída pela equipe de decisores. Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 Hierarquização dos critérios em relação a meta global para reutilização efluente final como água de reuso

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	Vetor de prioridade	%
C1	1,00	6,00	4,00	0,20	3,00	0,2327	23,27
C2	0,17	1,00	0,50	0,13	2,00	0,0656	6,56
C3	0,25	2,00	1,00	0,20	2,00	0,0977	9,77
C4	5,00	8,00	5,00	1,00	8,00	0,5517	55,17
C5	0,33	0,50	0,50	0,13	1,00	0,0523	5,23
Lambda máx.						5,34	
CI						0,085	
CR						0,076	

Fonte: autora, 2022.

Após realizados os procedimentos de cálculos, verificou-se que a matriz de critérios é consistente, pois apresentou $CR = 0,076$, ou seja, $CR < 0,1$. Assim as prioridades foram validadas.

Na visão da equipe decisora que contribuiu para a aplicação do método. O critério de benefício ambiental foi considerado o mais importante (55,17%), seguido por benefício para a empresa (23,27%), risco de contaminação (9,77%), custos com ampliação, manutenção e operação (6,56%) e por último prejuízo ambiental (5,23%).

Tais escolhas podem ser justificadas, pois na visão dos decisores, os benefícios ambientais e para a empresa serão muito mais relevantes do que os demais critérios. Acredita-se que os custos com a ampliação, manutenção e operação não serão altos, uma vez que grande parte da estrutura já está instalada e a água de reuso faz parte da rotina operacional da estação. Além de que, os riscos de contaminação e o prejuízo ambiental serão mínimos, uma vez que a água de reuso encontra-se dentro dos padrões exigidos por norma, fato este que não é difícil de ser alcançado, uma vez que a CASAN já está trabalhando na modernização do tratamento para melhora dos subprodutos gerados.

Uma vez definidas as prioridades de critérios, passou-se a comparação par a par das alternativas em relação aos critérios (Tabela 16).

Tabela 16 Hierarquização das alternativas em relação aos critérios para reutilização efluente final como água de reuso

BENEFÍCIO PARA A EMPRESA						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	3,0000	0,3333	0,1429	0,1057	10,57
A2	0,3333	1,0000	0,2000	0,1429	0,0547	5,47
A3	3,0000	5,0000	1,0000	0,2000	0,2162	21,62
A4	7,0000	7,0000	5,0000	1,0000	0,6234	62,34
Lambda máxima					4,25	
CI					0,082	
CR					0,091	
CUSTOS COM AMPLIAÇÃO, MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	3,0000	0,3333	0,1429	0,1057	10,57
A2	0,3333	1,0000	0,2000	0,1429	0,0547	5,47
A3	3,0000	5,0000	1,0000	0,2000	0,2162	21,62
A4	7,0000	7,0000	5,0000	1,0000	0,6234	62,34
Lambda máxima					4,25	
CI					0,082	
CR					0,091	
RISCO DE CONTAMINAÇÃO						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	0,5000	5,0000	3,0000	0,3050	30,50
A2	2,0000	1,0000	6,0000	4,0000	0,4869	48,69
A3	0,2000	0,1667	1,0000	0,2500	0,0591	5,91
A4	0,3333	0,2500	4,0000	1,0000	0,1490	14,90
Lambda máxima					4,14	
CI					0,047	
CR					0,052	
BENEFÍCIO AMBIENTAL						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	3,0000	0,3333	0,2000	0,1297	12,97

A2	0,3333	1,0000	0,2500	0,2000	0,0697	6,97
A3	3,0000	4,0000	1,0000	0,2500	0,2399	23,99
A4	5,0000	5,0000	4,0000	1,0000	0,5607	56,07
Lambda máxima					4,26	
CI					0,087	
CR					0,096	
PREJUÍZO AMBIENTAL						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,00000	3,00000	5,00000	0,33333	0,2822	28,22
A2	0,33333	1,00000	4,00000	0,33333	0,1608	16,08
A3	0,20000	0,25000	1,00000	0,16667	0,0580	5,80
A4	3,00000	3,00000	6,00000	1,00000	0,4990	49,90
Lambda máxima					4,21	
CI					0,071	
CR					0,079	

Fonte: autora, 2022.

Assim como na matriz de critérios, foram verificadas as consistências de todas as matrizes de alternativas, que apresentaram valores de CR menores que 0,1, validando os julgamentos.

Nota-se que a alternativa A4- utilização da água pela ASA, mostrou-se mais relevantes que as demais, sendo a mais bem colocada em 4 dos 5 critérios analisados. Apenas no critério risco de contaminação a alternativa A2- Irrigação de áreas verdes obteve uma nota maior.

Após determinada a prioridade das alternativas em relação aos critérios, elaborou-se a matriz de prioridade global (Tabela 17). Para isto, multiplicou-se o vetor de prioridade dos critérios pelo vetor de prioridade de cada alternativa, realizando a soma ao final do método.

Tabela 17 Matriz de prioridade global para reutilização efluente final como água de reuso

Alternativa critério	C1	C2	C3	C4	C5	SOMA	%
A1	0,0246	0,0069	0,0207	0,0716	0,0068	0,1306	13,06
A2	0,0127	0,0036	0,0131	0,0384	0,0036	0,0714	7,14
A3	0,0503	0,0142	0,0572	0,1324	0,0126	0,2666	26,66
A4	0,1450	0,0409	0,0067	0,3093	0,0293	0,5314	53,14

Fonte: autora, 2022.

Após a aplicação do método, concluiu-se que a melhor alternativa para a utilização do efluente como água de reuso é a utilização pela empresa terceirizada que presta serviços para a CASAN (53,14%), em seguida a utilização pelo Corpo de

Bombeiros nos exercícios de combate a incêndios (26,66%), depois a utilização pela COMCAP para lavagem de ruas e calçadas, além da lavagem no pátio da empresa (13,06%) e pôr fim a utilização pela Floram na rega de áreas verdes (7,14%).

6.5.2 Lodo e espuma

Para a maior clareza, definiu-se a meta global da análise como: Melhor alternativa para o reaproveitamento do lodo e da espuma gerados no tratamento e determinaram-se os critérios utilizados para a hierarquização (Quadro 17 Critérios selecionados para a aplicação do método AHP na seleção da melhor alternativa de reuso).

Quadro 17 Critérios selecionados para a aplicação do método AHP na seleção da melhor alternativa de reuso do lodo desaguado

CRITÉRIOS	
C1	Custos para implantação, manutenção e operação
C2	Benefício ambiental
C3	Risco de transmissão de doenças
C4	Problemas estéticos e sociais
C5	Risco de contaminação do solo, lençol freático, rio, flora e fauna

Fonte: autora, 2022.

A descrição dos critérios segue abaixo:

Custo de implantação, manutenção e operação: Parte-se do princípio de que a ETE não possui espaço físico que comporte um tratamento completar para o lodo. Para qualquer uma das alternativas, será necessário a aquisição de um terreno para a construção de um centro de gerenciamento de lodo (CGL). Assim, são os custos atrelados a aquisição de um terreno para a implantação, materiais para a construção da estrutura, projetos, transporte do lodo da ETE até o CGL, mão de obra, análises laboratoriais, energia elétrica, equipamentos elétricos, mecânicos e afins, armazenamento do subproduto.

Benefício ambiental: Pode-se citar como benefício ambiental advindo do reaproveitamento do lodo a ciclagem dos nutrientes encontrados na “torta” como N, P, Ca, Mg e K, diminuição da pressão sobre os recursos naturais, diminuição da utilização de agrotóxicos, diminuição da emissão de GEE, diminuição da pressão sobre os aterros sanitários, diminuição da poluição do solo e dos corpos d’água.

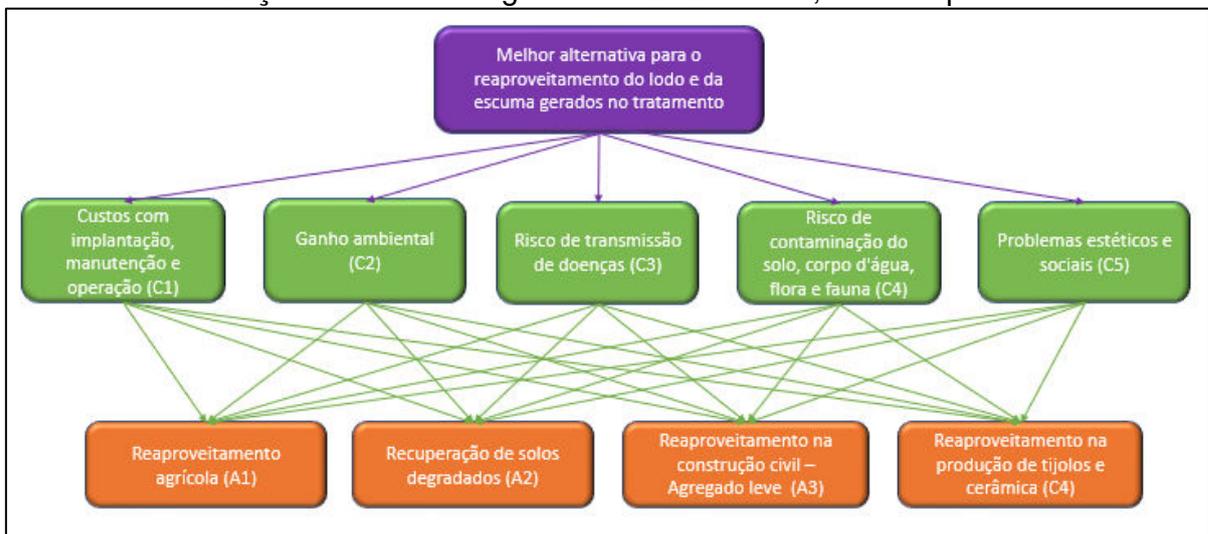
Risco de transmissão de doenças: Risco de transmissão de doenças pela densidade de patógenos no lodo, presença de vetores como roedores e insetos no local de aplicação e no CGL, presença de organismos patogênicos e concentração de compostos tóxicos nas culturas.

Problemas estéticos e sociais: São os problemas relacionados a aceitabilidade da população circunvizinha às áreas de disposição e do CGL, aceitabilidade de produtores e consumidores de produtos originários de áreas de disposição de lodo e valor das propriedades próximas a CGL e locais de disposição do lodo. Além de problemas com odor, fumaça, barulho, aumento da circulação de pessoas, caminhões e máquinas nas localidades próximas ao CGL.

Risco de contaminação do solo, da água, do ar, flora e fauna: São as possíveis alterações na qualidade da água, alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, presença de gases e substâncias tóxicas, presença de particulados em suspensão, fumaça e etc.

Com a meta global e os critérios definidos, elaborou-se a estrutura da problemática, conforme Figura 23.

Figura 23 Estrutura para hierarquização pelo método AHP da melhor alternativa de reutilização do lodo desaguado da ETE Insular, Florianópolis/SC.



Fonte: autora, 2022.

Iniciou-se com a elaboração da matriz dos critérios e a determinação das prioridades da empresa, construída pela equipe de decisores. Os resultados são apresentados Tabela 18.

Tabela 18 Hierarquização dos critérios em relação a meta global para reutilização do lodo desaguado

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	Vetor de prioridade	%
C1	1,0000	0,1429	0,1667	3,0000	0,2000	0,0647	6,47
C2	7,0000	1,0000	4,0000	7,0000	4,0000	0,4933	49,33
C3	6,0000	0,2500	1,0000	6,0000	2,0000	0,2330	23,30
C4	0,3333	0,1429	0,1667	1,0000	0,2000	0,0397	3,97
C5	5,0000	0,2500	0,5000	5,0000	1,0000	0,1693	16,93

Lambda máx.	5,42
CI	0,11
CR	0,095

Fonte: autora, 2022.

Após realizados os procedimentos de cálculos, verificou-se que a matriz de critérios é consistente, pois apresentou CR= 0,095, ou seja, CR<0,1. Assim as prioridades foram validadas.

Na visão da equipe decisora que contribuiu para a aplicação do método, o critério de benefício ambiental foi considerado o mais importante (49,33%), seguido pelo risco de transmissão de doenças (23,30%), risco de contaminação do solo, da água, do ar flora e fauna (16,93%), custos com ampliação, manutenção e operação (6,47%) e problemas estéticos e sociais (6,47%).

Assim como na aplicação do método para utilização da água de reuso, a equipe de decisores priorizou o benefício ambiental que as alternativas de reuso oferecem em comparação com o método atualmente empregado. As questões de saúde pública e risco atrelados ao meio ambiente vem em seguida, mas acredita-se que se bem gerida e controlada, estes riscos são minimizados e os benefícios são mais relevantes. Atualmente, gasta-se muito para dispor o lodo gerado na estação em aterros sanitários e a implantação de um centro de gerenciamento de lodo será mais vantajosa no longo prazo. Quanto aos problemas estéticos e sociais, acredita-se que podem ser minimizados de diversas maneiras, iniciando-se pela escolha de um local afastado, com controle de emissão de odores, barulho e fumaça. Campanhas de conscientização também podem contribuir com este tabu.

Uma vez definidas as prioridades de critérios, passou-se a comparação par a par das alternativas em relação aos critérios (Tabela 19).

Tabela 19 Hierarquização das alternativas em relação aos critérios para reutilização do lodo desaguado

CUSTO DE IMPLANTAÇÃO, MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	0,5000	5,0000	5,0000	0,3532	35,32
A2	2,0000	1,0000	4,0000	4,0000	0,4458	44,58
A3	0,2000	0,2500	1,0000	3,0000	0,1278	12,78
A4	0,2000	0,2500	0,3333	1,0000	0,0733	7,33
Lambda máx.					4,26	
CI					0,090	
CR					0,099	
BENEFÍCIO AMBIENTAL						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	2,0000	3,0000	3,0000	0,4215	42,15
A2	0,5000	1,0000	4,0000	4,0000	0,3468	34,68

A3	0,3333	0,2500	1,0000	2,0000	0,1357	13,57
A4	0,3333	0,2500	0,5000	1,0000	0,0960	9,60
Lambda máx.					4,18	
CI					0,061	
CR					0,068	
RISCO DE TRANSMISSÃO DE DOENÇAS						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	0,3333	0,1429	0,1429	0,0507	5,07
A2	3,0000	1,0000	0,1667	0,1667	0,0960	9,60
A3	7,0000	6,0000	1,0000	0,5000	0,3543	35,43
A4	7,0000	6,0000	2,0000	1,0000	0,4990	49,90
Lambda máx.					4,18	
CI					0,060	
CR					0,067	
RISCO AMBIENTAL						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	3,0000	0,2500	0,2500	0,1305	13,05
A2	0,3333	1,0000	0,2000	0,2000	0,0669	6,69
A3	4,0000	5,0000	1,0000	2,0000	0,4696	46,96
A4	4,0000	5,0000	0,5000	1,0000	0,3330	33,30
Lambda máx.					4,16	
CI					0,054	
CR					0,060	
PROBLEMAS ESTÉTICOS E AMBIENTAIS						
	A1	A2	A3	A4	Vetor de prioridade	%
A1	1,0000	3,0000	5,0000	5,0000	0,5341	53,41
A2	0,3333	1,0000	4,0000	4,0000	0,2822	28,22
A3	0,2000	0,2500	1,0000	2,0000	0,1082	10,82
A4	0,2000	0,2500	0,5000	1,0000	0,0755	7,55
Lambda máx.					4,16	
CI					0,053	
CR					0,059	

Fonte: autora, 2022.

Assim como na matriz de critérios, foram verificadas as consistências de todas as matrizes de alternativas, que apresentaram valores de CR menores que 0,1, validando os julgamentos.

Por meio da análise da Tabela 19 é possível perceber que não existe uma alternativa que seja melhor às demais globalmente, pois todas as alternativas apresentaram pelo menos em um critério como prioridade. A alternativa de reutilização do lodo na agricultura foi a única que obteve pontuações maiores em duas comparações distintas.

Após determinada a prioridade das alternativas em relação aos critérios, elaborou-se a matriz de prioridade global (Tabela 20). Para isto, multiplicou-se o vetor de prioridade dos critérios pelo vetor de prioridade de cada alternativa, realizando a soma ao final do método.

Tabela 20 Matriz de prioridade global para reutilização efluente final como água de reuso

Alternativa/critério	C1	C2	C3	C4	C5	SOMA	%
A1	0,0229	0,2079	0,0118	0,0052	0,0905	0,3382	33,82
A2	0,0289	0,1711	0,0224	0,0027	0,0478	0,2727	27,27
A3	0,0083	0,0670	0,0825	0,0186	0,0183	0,1947	19,47
A4	0,0047	0,0474	0,1162	0,0132	0,0128	0,1943	19,43

Fonte: autora, 2022.

Após a aplicação do método, concluiu-se que a melhor alternativa para o reaproveitamento do lodo e a espuma gerados na estação é na agricultura (33,82%), em seguida é o reaproveitamento na recuperação de áreas de gradadas (27,27%) e tecnicamente empatadas as duas últimas alternativas, o reaproveitamento na construção civil como agregado leve (19,47%) e o reaproveitamento na produção de cimento Portland (19,43%).

7 CONCLUSÃO

Atualmente a Estação de tratamento de esgoto Insular gera como produto o efluente final e como subprodutos os sólidos gradeados e o lodo desaguado. Por tratar-se de um sistema de tratamento aeróbio, há baixíssima produção de biogás e no local não há medição ou coleta do mesmo.

No presente estudo, trabalhou-se apenas com a reutilização do efluente final como água de reuso para fins urbanos não potáveis e com alternativas para o reaproveitamento do lodo desaguado. A destinação final dada ao efluente final atualmente é o lançamento por meio de emissário submarino no Baía Sul, enquanto o lodo desaguado é enviado para disposição em aterro sanitário.

No período analisado de 2019 a 2021, a CASAN gastou R\$9.485.895,61 com o tratamento do efluente desde sua chegada na estação até o lançamento no corpo receptor e mais o montante de R\$3.417.600,58 com coleta, transporte e disposição final em aterro sanitário do lodo desaguado gerado.

Por meio da caracterização física, química e biológica realizada para o efluente final e para o lodo desaguado, constatou-se que o primeiro, nas condições atuais, não pode ser utilizado como água de reuso, pois o parâmetro de *Escherichia coli* encontra-se fora dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 13.969/1997. Enquanto o segundo também precisa de tratamentos completos, uma vez que não está estabilizado e em consequência disto, o parâmetro de coliformes termotolerantes apresenta valores acima do permitido pela Resolução CONAMA 375/2006.

Foi possível realizar um levantamento de alternativas sustentáveis para a reutilização dos subprodutos e por meio do método AHP hierarquizá-las. O método foi uma proposta interessante para o trabalho, pois é uma técnica que auxilia os gestores na tomada de decisão englobando diferentes critérios, apresenta modelagem matemática flexível, grande versatilidade, estimula a interação de diversas áreas envolvidas promovendo o debate, possibilita quantificar critérios qualitativos, conectando os critérios técnicos e numéricos em uma única avaliação.

Assim, concluiu-se que a alternativa de reuso mais viável para a ETE insular é a utilização do efluente pela empresa terceirizada que presta serviços para a CASAN, nos serviços de desobstrução de redes coletoras de esgoto e serviços operacionais em estações. Já como alternativa de reaproveitamento do lodo desaguado, a alternativa mais vantajosa é a reutilização agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AISSE, Miguel Mansur. **Painel 3: Soluções e alternativas para o tratamento de esgotos**: sustentabilidade no tratamento de esgoto: desafios e avanços. Porto Alegre: ABES-RS, 2019. 60 slides, color.
- ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 444 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 6).
- ANDREOLI, Cleverson Vitorio. **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. [S.l]: Abes, 2006. 417 p.
- ARAÚJO, Cleane Cruz de; CARVALHO, Klenya Soraya Araújo de; RUFFO, Pedro Henrique Alves Guedes; CARVALHO, Ricardo Santos de; LEITE, Vanessa Leandro de Lucena; MELO, Marco Aurélio Rodrigues de. REUSO DE ÁGUA NO CANTEIRO DE OBRA: sustentabilidade, viabilidade e insumos. **Revista Acta Scientia**, [S.l], v. 2, n. 2, p. 1-12, jul. 2020.
- ARRUDA, Luis; QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves. Sustentabilidade: um longo processo histórico de reavaliação crítica da relação existente entre a sociedade e o meio ambiente. **B. Téc. Senac: A R. Educ. Prof.**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 3, p. 53-63, dez. 2010.
- BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade**: o que é? - o que não é. Petrópolis, RJ: Vozes, 2017.
- BRANDT, Emanuel Manfred Freire *et al.* Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. **Engenharia Cadernos Técnicos Sanitária e Ambiental**: Coletânea de Notas Técnicas 1: Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 5-22, 2021.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento** / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – 5.ed. Brasília: Funasa, 2019a. 545 p.: il.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Agência Nacional de Águas. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**/ Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2019b.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Agência Nacional de Águas. **Atlas esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**/ Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. -- Brasília: A, 2017.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)**: mais

saúde com qualidade de vida e cidadania. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral**. Ano de referência 2020. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021a.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB): Relatório de Avaliação Anual 2019**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021.

BRASIL. *Resolução CNRH n. 54, de 28 de novembro de 2005*. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 9 mar. 2006. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/reuso-de-agua-recursos-hidricos/37-resolucao-n-54-de-28-de-novembro-de-2005/file>. Acesso em: 30 dez. 2021.

BRASIL. *Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, 16 mai. 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 10 fev. 2022.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil** / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Oliver Jende ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. 74 p.

BRETAS, Paulo Roberto; MELO, Marília (org.). **A engenharia e a sustentabilidade**. Belo Horizonte: Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais - Crea-Mg, 2018a. 44 p.

BRETAS, Paulo Roberto; MELO, Marília (org.). **Energia e mudanças climáticas: a engenharia e a sustentabilidade**. Belo Horizonte: Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais – Crea-Mg, 2018b. 48 p.

BRUNDTLAND, Gro Harlem. **Nosso futuro comum: comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento**. 2.ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CASAN. Governo do Estado de Santa Catarina. **NO DIA DE SEU ANIVERSÁRIO, CASAN LICITA MAIOR OBRA DE SANEAMENTO DO ESTADO**. 2020. Disponível em: <https://www.casan.com.br/noticia/index/url/no-dia-de-seu-aniversario-casan-licita-maior-obra-de-saneamento-do-estado#0>. Acesso em: 02 jan. 2022.

CASAN. **FLORIANÓPOLIS: MAIOR ETE DE FLORIANÓPOLIS ADOTARÁ NOVA TECNOLOGIA DE DEPURAÇÃO**. 2021b. Disponível em:

<https://www.casan.com.br/noticia/index/url/florianopolis-maior-ete-de-florianopolis-adoptara-nova-tecnologia-de-depuracao#0>. Acesso em: 13 dez. 2021.

CASAN. **FLORIANÓPOLIS: MAQUINÁRIO PESADO GARANTE AVANÇOS NA MODERNIZAÇÃO DA ETE INSULAR**. 2021c. Disponível em: <https://www.casan.com.br/noticia/index/url/florianopolis-maquinario-pesado-garante-avancos-na-modernizacao-da-ete-insular#0>. Acesso em: 10 fev. 2022.

CASAN. **HISTÓRIA DA CASAN**. 2021a. Disponível em: <https://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/historia-da-casan#0>. Acesso em: 13 dez. 2021.

CASAN. **Programa de saneamento ambiental de Santa Catarina**: sistema de esgotamento sanitário (SES INSULAR). Florianópolis: Casan, 2019. 19 slides, color.

CETESB. **Conferências Internacionais**. 2012. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/conferencias-internacionais-sobre-o-meio-ambiente/>. Acesso em: 21 dez. 2021.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Aproveitamento de subprodutos do esgoto | ETEs Sustentáveis. 10º Encontro Técnico CASAN Inovando para o Futuro. [S.l]: Moodle Universidade Corporativa CASAN, 2021. Acesso em: 17 jan. 2022.

DODDS, Richard (ed.). **Engineering for Sustainable Development: Guiding Principles**. Londres: The Royal Academy Of Engineering, 2005. 52 p.

ELKINGTON, John. **Sustentabilidade Canibais com garfo e faca**. São Paulo: M.Books do Brasil Editora Ltda., 2012.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. 2022. **Economia circular**. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/conceito>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ESTADO DE SANTA CATARINA (Estado). Estabelece as diretrizes para os padrões de lançamento de esgotos domésticos de sistemas de tratamento públicos e privados. **Resolução Consema Nº 182, de 06 de agosto de 2021**. Florianópolis: Consema, 06 ago. 2021. Disponível em: <https://www.sde.sc.gov.br/index.php/biblioteca/consema/legislacao/resolucoes/1755-resolucao-consema-n-182-2021/file>. Acesso em: 10 fev. 2022.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C.V. Produção e características do bio sólido. **PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico**, 1999.

FONSECA, José Manuel Novo. **Valorização energética de resíduos para uma economia circular: O estado da arte em Portugal**. 2020. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2020.

FREITAS, Moreira Samya de; OLIVEIRA, Santos Sara Dorea de; SOUZA, Sardinha Aline; ANTÔNIO, Pereira Júnior. O lodo de ETE como alternativa para a recuperação

do solo em áreas degradadas. **Brazilian Applied Science Review**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 1564-1585, 2019. Brazilian Applied Science Review. <http://dx.doi.org/10.34115/basrv3n3-006>.

FREITAS, Renata Xavier Alberico; MELO, Geraldo Aclécio. Avaliação do uso de biocomposto de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas. **Revista Monografias Ambientais**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 2665-2673, 30 ago. 2013. Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/223613087992>.

GEOFIX. **Estaca Raiz**. Disponível em: <http://www.geofix.com.br/servico-estaca-raiz.php#:~:text=A%20Estaca%20Raiz%20%C3%A9%20uma,em%20rocha%20ou%20em%20solo>. Acesso em: 10 fev. 2022.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Governador autoriza obra de mais de R\$ 144 milhões na maior Estação de Tratamento de Esgoto de Santa Catarina**. 2020. Disponível em: <https://www.sc.gov.br/noticias/temas/saneamento-e-recursos-hidricos/governador-autoriza-obra-de-mais-de-r-144-milhoes-na-maior-estacao-de-tratamento-de-esgoto-de-santa-catarina>. Acesso em: 12 jan. 2022.

GTSC A2030. **ODS**. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/ods/>. Acesso em: 20 jan. 2022.

INCT ETES SUSTENTÁVEIS. **Subprodutos sólidos**. Disponível em: <https://etes-sustentaveis.org/subprodutos-solidos/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Segrac, 2005. 932 p.

LEGNER, Carla. Estação de tratamento de esgoto sustentável: O novo paradigma do saneamento. **Revista Tae Especializada em Tratamento de Água & Efluentes**, Santo André, v. 60, n. 1. Mensal. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/697/estacao-de-tratamento-de-esgoto-sustentavel-o-novo-paradigma-do-saneamento>. Acesso em: 25 nov. 2021.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2016. 1980 p. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa.

MOTA, Francisco Suetônio Bastos; VON SPERLING, Marcos (org.). **PROSAB: nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: Abes Rj, 2009. 430 p.

MOUNTFORD, Helen *et al.* World Resources Institute (ed.). **Top Takeaways from the UN World Leaders Summit at COP26**. 2021. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/top-takeaways-un-world-leaders-summit-cop26>. Acesso em: 26 nov. 2021.

MOURA, Priscila Gonçalves; ARANHA, Felipe Nicolau; HANDAM, Natasha Berendonk; MARTIN, Luis Eduardo; SALLES, Maria José; CARVAJAL, Elvira;

JARDIM, Rodrigo; SOTERO-MARTINS, Adriana. Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 791-808, dez. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152202020180201>.

OLIVEIRA, Daniel Vieira Minegatti de; VOLSCHAN JUNIOR, Isaac; PIVELI, Roque Passos. Avaliação comparativa entre custos dos processos MBBR/IFAS e lodo ativado para o tratamento de esgoto sanitário. **Dae**, São Paulo, n. 193, p. 46-55, set. 2013. Quadrimestral.

OLIVEIRA, Guilherme; KIKKAWA, Larissa Sayuri; SANTOS, Alana Melo dos. Reutilização de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) na Região de Suzano, São Paulo, Brasil: alternativas e oportunidades. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [S.L.], v. 5, n. 10, p. 999-1007, 2018. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. <http://dx.doi.org/10.21438/rbgas.051115>.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org>>. Acesso em: 21 nov. 2021. Tradução: Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio).

PEREIRA, Ederson Cristovão. **AVALIAÇÃO DO USO E CONSUMO DE ÁGUA NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2018. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso Superior em Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

PEREIRA, Mirella dos Santos. UTILIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental Gvaa - Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas**, Pombal, v. 9, n. 1, p. 1-8, jan. 2015.

PODKOWA, Leticia Daiane; FLIEGNER, Ana Paula; FUCILINI, Sabrina Taisa; MINUZZI, Pâmela; MÜLLER, Maico; DARONCO, Giuliano. **ALTERNATIVAS PARA A EMPREGABILIDADE DO LODO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Unijuí: Salão do Conhecimento Unijuí, 2015. 7 p.

República Portuguesa. **Economia Circular**. 2022. Disponível em: <https://www.dgae.gov.pt/servicos/sustentabilidade-empresarial/economia-circular.aspx>. Acesso em: 28 dez. 2021.

RICCI et al. Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado. I – Atributos físicos e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.2, p.535-542, 2010.

RODRIGUEZ, Diego J. Economia Circular no Tratamento de Esgoto: Novas Perspectivas para a Recuperação de Recursos. Coordenação de Abes, Iwa, Banco Mundial e Inct Etes Sustentáveis. Roteiro: Diego J. Rodriguez. [S.I]: Youtube, 2020. (111 min.), son., color. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=BBIA6_T7z88&t=554s. Acesso em: 11 jan. 2021.

SAMPAIO, Thalita Fernanda; GUERRINI, Iraê Amaral; BACKES, Clarice; HELIODORO, Julia Carolina Athanázio; RONCHI, Helena Souza; TANGANELLI, Kaliana Moro; CARVALHO, Nayara Cristina de; OLIVEIRA, Fernando Carvalho. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 1637-1645, nov. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000500028>.

SANTOS, Ailton Dias dos; JOHN, Vanderley Moacyr. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP: reciclagem do lodo de esgoto da região metropolitana de São Paulo - RMSP**. São Paulo: EPUSP, 2007. 21 p.

SILVA, J. M. **Higienização do lodo de estação de tratamento de esgoto para utilização como material de cobertura de aterro sanitário**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2013. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC

SOUZA, Maelson Mendonça de; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos; ARAËJO, André Luis Calado; SOARES, Amanda Virgínia de Oliveira; SOUZA, Pedro Canísio Azevedo de. Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-10, 20 set. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0922>.

TAY, J. H.; YIP, W. K.; SHOW, K.Y. Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material. **Journal of Environmental Engineering**, v. 117, n. 6, p. 834-44, 1991.

TORRES, Dayana Melo. TRATAMENTO DE EFLUENTES E PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO PARA FINS AGRÍCOLAS. **Holos**, [S.L.], v. 8, p. 1-15, 24 dez. 2019. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2019.9192>.

TRENNEPOHL, Felipe Gustavo. **PROJETO DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL – ETE INSULAR, EM FLORIANÓPOLIS/SC**. 2018. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos Para A Gestão Municipal de Recursos Hídricos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Florianópolis, 2018.

UNFCCC. **The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26**. 2021. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>. Acesso em: 21 dez. 2021.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018a. 470 p.

VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018b. 461 p.

WORRELL, E. et al. CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY. **Energy Environ**, v. 26, p. 303–329, 2001. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.26.1.303>