



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

LUIS DEIVID PAULINO DE ARAGÃO

**PROPOSTA DE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS
PARA O CAMPUS DA UFC DE CRATEÚS-CE**

CRATEÚS-CE

2023

LUIS DEIVID PAULINO DE ARAGÃO

PROPOSTA DE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA
O CAMPUS DA UFC DE CRATEÚS-CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Profa. Dra. Raimunda Moreira da Franca.

CRATEÚS-CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A671p Aragão, Luis Deivid Paulino de.
Propostas de sistemas alternativos de tratamento de esgotos para o campus da UFC de Crateús-CE /
Luis Deivid Paulino de Aragão. – 2023.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Crateús, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Raimunda Moreira da Franca.

1. Sistemas de tratamento de efluentes. 2. Campus da UFC em Crateús. 3. Sistema wetlands francês. I.
Título.

CDD 628

LUIS DEIVID PAULINO DE ARAGÃO

PROPOSTA DE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA
O CAMPUS DA UFC DE CRATEÚS-CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Raimunda Moreira da Franca (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Ms Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pela dádiva do conhecimento e, por sempre estar comigo, mesmo naqueles momentos em que nada parece fazer sentindo.

Aos meus pais, Maria José e Manoel Messias, por todo o apoio e carinho nesse período de graduação. Agradeço também a minha irmã, Daiana, por sempre me ajudar e torcer pelo meu sucesso e, ao meu sobrinho, Pedro Henrique, que sempre me alegra e distraí nos momentos difíceis.

Agradeço a todos os meus familiares, que contribuíram diretamente ou indiretamente para que esse momento chegasse e aos meus amigos, que me apoiam, motivam e me repreendem quando necessário, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas e amigos que encontrei nessa caminhada, onde compartilhamos vivências, dificuldades, conhecimentos, felicidades e momentos, que, sem eles, teria sido impossível chegar até aqui. A todos os meus professores, pela competência e dedicação no qual desenvolvem suas atribuições e, por todo conhecimento repassado. Lembrarei de todos com afeto e admiração.

A minha orientadora, professora Doutora Raimunda Moreira da Franca, pelo suporte, atenção, comprometimento, profissionalismo e paciência e, pelas instruções que foram fundamentais na elaboração desse projeto.

E por fim, agradeço a Universidade Federal do Ceará, uma instituição excelente e referência no ensino e, a todos os profissionais que contribuem para que esse padrão de qualidade seja atingido.

“Sucesso não é a chave para a felicidade; felicidade é a chave para o sucesso. Se você ama o que faz, você será bem sucedido”.

Arbert Schweitzer

RESUMO

O município de Crateús está localizado na região semiárida do Nordeste brasileiro, onde ocorrem frequentes conflitos pelo uso da água, devido aspectos quantitativos, resultado da escassez hídrica, decorrente das condições climáticas locais, bem como, por aspectos qualitativos, esse segundo, em razão da contaminação dos mananciais, parte disso, pela utilização de sistemas inadequados de disposição e tratamento dos efluentes, onde fossas rudimentares ainda são bastante empregadas. Tendo em vista que o campus da UFC em Crateús também conta com um sistema de fossa rudimentar, esse projeto dimensiona e compara diferentes alternativas de sistemas de tratamento de efluentes para o campus, respeitando as exigências legais e normativas vigentes. Para o projeto foram consideradas duas alternativas de tratamento de esgotos sanitários, um sistema composto por fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios e reúso na irrigação das áreas verdes e, um sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical. A metodologia de projeto compreende a caracterização da área de estudo, a caracterização do efluente gerado, estudos populacionais, a determinação dos parâmetros de projeto, a caracterização das alternativas propostas, os dimensionamentos, a elaboração de um plano orçamentário e a seleção da alternativa mais viável para as condições existentes. Com base em uma matriz de decisão, o sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical foi considerado o mais adequado para o Campus, devido seu menor custo de implantação, necessidade de menores áreas de projeto e maiores eficiências esperadas na remoção dos poluentes. O sistema de fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios teve um custo preliminar de implementação de R\$ 74.588,82. Já o custo preliminar para a implantação do sistema *wetlands* francês foi de R\$ 55.646,99. A remoção esperada de DBO no sistema de fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios é de até 85%, já a remoção de DBO esperada para o sistema *wetlands* francês é de mais de 90%. Embora o sistema *wetlands* francês tenha sido o mais indicado para atender as condições existentes no Campus, ambos os sistemas são passíveis de aplicação.

Palavras-chave: Sistemas de tratamento de efluentes. Campus da UFC em Crateús. Sistema *wetlands* francês.

ABSTRACT

The municipality of Crateús is located in the semi-arid region of the Brazilian Northeast, where there are frequent conflicts over the use of water, due to quantitative aspects, the result of water scarcity, resulting from local climatic conditions, as well as, due to qualitative aspects, this second one, due to the contamination of water sources, partly due to the use of inadequate effluent disposal and treatment systems, where rudimentary septic tanks are still widely used. Considering that the UFC campus in Crateús also has a rudimentary septic tank system, this project sizes and compares different alternative effluent treatment systems for the campus, respecting current legal and regulatory requirements. For the project, two alternatives for treating sanitary sewage were considered: a system composed of septic tanks followed by anaerobic filters and reuse for irrigation of green areas, and a French wetlands system adapted to the subtropical climate. The project methodology comprises the characterization of the study area, the characterization of the effluent generated, population studies, the determination of project parameters, the characterization of the proposed alternatives, sizing, the elaboration of a budget plan and the selection of the most viable alternative to existing conditions. Based on a decision matrix, the French wetlands system adapted to the subtropical climate was considered the most suitable for the Campus, due to its lower implementation cost, need for smaller project areas and greater efficiencies expected in removing pollutants. The system of septic tanks followed by anaerobic filters had a preliminary implementation cost of R\$74,588.82. The preliminary cost for implementing the French wetlands system was R\$55,646.99. The expected BOD removal in the septic tank system followed by anaerobic filters is up to 85%, while the expected BOD removal for the French wetlands system is more than 90%. Although the French wetlands system was the most suitable to meet the conditions existing on the Campus, both systems can be applied.

Keywords: Effluent treatment systems. UFC campus in Crateús. French wetlands system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - <i>Wetland</i> construído de fluxo horizontal.....	22
Figura 02 - <i>Wetland</i> construído de fluxo vertical.....	23
Figura 03 - Fossa séptica retangular de câmara única.....	23
Figura 04 - Filtro anaeróbio.....	25
Figura 05 - Delineamento metodológico.....	26
Figura 06 - Localização do Campus de Crateús.....	27
Figura 07 - Unidade de tratamento preliminar.....	38
Figura 08 - Configuração do sistema fossa séptica seguido de filtro anaeróbio e reúso.	42
Figura 09 - Configuração do sistema <i>wetlands</i> francês.....	43
Figura 10 - Altura das camadas constituintes dos leitos filtrantes dos <i>wetlands</i>	44
Figura 11 - Composição das camadas do leite filtro dos módulos do 1º estágio.....	45
Figura 12 - Composição das camadas do leite filtrante dos módulos do 2º estágio.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Normas utilizadas.....	17
Quadro 02 - Vazões de projeto.....	29
Quadro 03 - Critérios de seleção da alternativa.....	35
Quadro 04 - Critérios de seleção e suas respectivas pontuações.....	35
Quadro 05 - Estimativa do número de alunos matriculados por ano.....	37
Quadro 06 - Vazões de projeto calculadas.....	37
Quadro 07 - Dimensões da unidade preliminar de tratamento.....	39
Quadro 08 - Dimensões das fossas sépticas.....	40
Quadro 09 - Dimensões dos filtros anaeróbios.....	40
Quadro 10 - Dimensões dos módulos dos <i>wetlands</i>	41
Quadro 11 - Eficiências de remoção esperadas para o sistema composto por fossa séptica seguida de filtro anaeróbio.....	47
Quadro 12 - Eficiências de remoção esperadas para um sistema <i>wetlands</i> francês adaptado ao clima subtropical.....	47
Quadro 13 - Orçamento preliminar do sistema composto por fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios e reúso.....	48
Quadro 14 - Orçamento preliminar do sistema <i>wetlands</i> francês adaptado ao clima subtropical.....	49
Quadro 15 - Matriz de decisão.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Aegea	Ambiental Ceará
Art	Artigo
BR	Brasil
Cagece	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CE	Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GOV	Governo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
m	Metro
mm	Milímetros
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
RAMAL	Reator Anaeróbio de Manta de Lodo
Seinfra	Secretaria de infraestrutura
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico
SS	Sólidos suspensos
SSP	Subespécie
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Contextualização.....	13
1.2	Objetivos.....	14
1.2.1	Geral.....	14
1.2.2	Específicos.....	14
1.3	Justificativa.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Cenário atual do saneamento básico no Brasil.....	16
2.2	Aspectos legais e normativos.....	17
2.3	Métodos mais empregados para tratamento de esgotos domésticos no Brasil.....	18
2.4	Sistemas alternativos de tratamento de esgoto para comunidades isoladas.....	19
2.4.1	<i>Wetlands</i> construídos.....	19
2.4.2	Fossa séptica seguido de filtro anaeróbio e reúso.....	23
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Caracterização da área de estudo.....	27
3.2	Estudos preliminares.....	28
3.2.1	Caracterização do efluente.....	28
3.2.2	Estudos populacionais, período e área de projeto.....	29
3.2.3	Parâmetros de projeto.....	29
3.3	Caracterização das alternativas propostas.....	30
3.4	Dimensionamentos.....	30
3.5	Avaliação econômica.....	35
3.6	Seleção da alternativa.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1	Estimativa populacional.....	37
4.2	Vazões de projeto.....	37
4.3	Dimensionamentos.....	38
4.3.1	Dimensionamento da estação de tratamento preliminar.....	38
4.3.2	Dimensionamento da fossa séptica e do filtro anaeróbio.....	39
4.3.3	Dimensionamento do sistema <i>wetlands</i> francês.....	40
4.4	Caracterização dos sistemas propostos.....	41
4.4.1	Fossa séptica seguida de um filtro anaeróbio e reúso na irrigação das áreas verdes.....	41
4.4.2	<i>Wetlands</i> francês adaptado ao clima subtropical.....	42
4.5	Eficiência esperada.....	46
4.6	Orçamento preliminar das alternativas.....	47
4.7	Seleção da alternativa.....	51

5	CONCLUSÃO.....	52
	REFERÊNCIAS.....	54
	APÊNDICE A – Memorial de cálculo.....	59
	APÊNDICE B – Vista lateral, do terreno e 3D do sistema formado por fossa séptica seguida de filtro anaeróbio e reúso.....	65
	APÊNDICE C – Vista do terreno e 3d do sistema <i>wetlands</i> francês.....	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A quantidade de água necessária para a realização das atividades humanas diárias, tanto nos processos produtivos, quanto para o abastecimento humano propriamente dito, vem aumentando significativamente no Brasil (LEONETI; PRADO; OLIVEIRA, 2011). Esse aumento no consumo de água resulta em produções mais expressivas de esgotos, conseqüentemente, de maiores recursos para o seu gerenciamento.

O tratamento apropriado dos esgotos, além de prevenir e controlar a incidência de doenças, principalmente infecciosas e parasitárias, evita a poluição do solo e das águas dos mananciais, bem como, a ocorrência de vetores, promove novos hábitos higiênicos na população, maior qualidade de vida e redução da poluição visual. O devido tratamento dos efluentes também assume importância econômica, uma vez que, diminui as despesas com serviços de saúde, reduz os custos do tratamento de águas para abastecimento e promove o turismo (BRASIL, 2006).

O município de Crateús está localizado na região semiárida do Nordeste brasileiro, onde ocorrem frequentes conflitos pelo uso da água, devido aspectos quantitativos, resultado da escassez hídrica, decorrente das condições climáticas locais, bem como, por aspectos qualitativos, parte disso, em razão da contaminação constante dos mananciais. O despejo irregular de efluentes industriais e domésticos nos corpos hídricos sem o devido tratamento e a contaminação das águas subterrâneas em virtude do uso de sistemas inadequados de disposição dos esgotos são as principais fontes potenciais de degradação dos recursos hídricos.

O município se tornou um polo acadêmico da região, isso por causa dos inúmeros cursos de graduação ofertados em Crateús, como consequência disso, a população da cidade aumentou muito nos últimos anos, exigindo maiores investimentos em infraestrutura. O sistema de coleta e tratamento de esgotos atual não atende todos os moradores, onde muitos ainda fazem uso de fossas rudimentares para destinar seus efluentes, realidade também do Campus do UFC de Crateús. Esse tipo de destinação reduz a quantidade dos mananciais, tendo em vista que, fossas rudimentares são praticamente buracos no solo para onde são direcionados os efluentes sem nenhum tratamento prévio.

Diante disso, fica evidente a necessidade de ações que reduzam os impactos da problemática situação ambiental em que o município se encontra, principalmente no que se

refere ao tratamento dos efluentes gerados. Com base nisso, esse trabalho visa analisar e comparar diferentes alternativas de tratamento de efluentes para o campus da UFC de Crateús, buscando contribuir para melhor qualidade de vida dos que frequentam a universidade e a preservação ambiental, além de adequar a faculdade às legislações vigentes de saneamento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

- a) Dimensionar e comparar diferentes alternativas de sistemas de tratamento de esgoto para o campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará respeitando as exigências legais e normativas vigentes.

1.2.2 Específicos

- a) Dimensionar os sistemas alternativos de tratamento sugeridos, de forma a determinar a eficiência esperada de todos os sistemas propostos.
- b) Apresentar um plano orçamentário para cada modelo de tratamento.
- c) Realizar uma análise crítica de todos os sistemas propostos, indicando o mais viável para atender as condições existentes no campus de Crateús.

1.3 Justificativa

Em Crateús, além da disponibilidade de água ser comprometida pelo regime hídrico da região, os mananciais são vastamente contaminados devido o tratamento inapropriado dos efluentes. O saneamento básico é fundamental para assegurar o bem-estar e desenvolvimento socioeconômico de todas as comunidades. Sabendo das consequências que a debilidade desses serviços desencadeia, esse trabalho justifica-se pela necessidade de modificar a atual forma de destinação dos efluentes do campus, tendo em vista os inúmeros impactos negativos que as fossas rudimentares propiciam.

Esse trabalho também é justificado pelo Art. 225 da Constituição Federal, que determina que todos temos direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial a sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações

(BRASIL, 1988). Assim como, pela lei nº. 14026 de 2020, que estabelece uma meta de atendimento de 90% da população até 2033 com esgotamento sanitário (BRASIL, 2020).

Com base nisso e tendo em vista que o campus conta apenas com fossa rudimentar para destinar os seus efluente, através desse trabalho pretende-se conceber um estudo de concepção, dimensionar e comparar a viabilidade de implantação das alternativas de tratamento de efluentes propostas para atender o campus da UFC de Crateús, visando promover melhor qualidade de vida, preservação dos mananciais e reduzir a poluição estética.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cenários atuais do saneamento básico no Brasil

No Brasil, o processo de difusão dos serviços de saneamento é lento, apesar do Plano Nacional de Saneamento ter definido uma prévia universalização até 2033. Segundo o Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas (2017), cerca de 61,4% dos esgotos brasileiros são coletados, desses, apenas 42,6% são tratados antes do lançamento nos corpos receptores, os outros 38,6% configuram o pior cenário, onde não são tratados e nem coletados.

A região que apresenta o maior índice de fornecimento de rede de esgoto é o Sudeste, atendendo 71,4 milhões de pessoas, que representa 81,7% da sua população. Já a região com menores números é o Norte, com uma rede de esgoto que abrange apenas 14% da população. Em relação ao tratamento dos esgotos, a região Centro-Oeste trata 60,5% dos seus efluentes, sendo a região com as melhores condições. Assim como na coleta, o Norte apresenta baixos índices de tratamento, onde apenas 20,6% dos efluentes são tratados (SNIS, 2021).

O Nordeste trata 35,5% dos seus esgotos e coleta 30,2% (SNIS, 2021), essa diferença é reflexo da comum utilização de soluções individuais, que trata os efluentes próximos às fontes geradoras, sem a necessidade de coleta pela rede pública.

No Ceará, segundo a Cagece (2022), o índice de cobertura de esgoto no estado é de 44,8%, atendendo aproximadamente 2,69 milhões de pessoas. Cerca de 40% dos esgotos no Ceará são coletados e tratados, 3,98% são coletados, mas não são tratados e, 25,77% não são tratados e nem coletados. Os outros 30,49% são destinados a partir de soluções individuais (Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas, 2022). Uma meta da parceria pública e privada firmada entre a Cagece e pela Ambiental Ceará (Aegea), que assumiu o saneamento na capital e em parte do interior cearense, prevê uma cobertura de 90% em 24 cidades do Ceará até 2033 com coleta e tratamento de esgoto (CEARÁ, 2023).

Em Crateús, conforme o censo de 2010 do IBGE, dos domicílios particulares permanentes da sede, 70,59% dispõem de formas consideradas adequadas de esgotamento sanitário (rede de esgoto e fossa séptica), os outros 29,41% dos domicílios ainda utilizam métodos inadequados de destinação final dos esgotos, sendo fossas rudimentares a grande maioria (CRATEÚS, 2015).

2.2 Aspectos legais e normativos

A Lei n.º 11.445/2007 estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. Essa lei define o saneamento básico como o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e, drenagem e manejo das águas pluviais urbanas.

Em 2020, a Lei n.º 14.026 atualizou o marco legal do saneamento básico e alterou a lei n.º 11.405/2007, aprimorando as condições estruturais do saneamento básico no país. A lei define o “esgotamento sanitário” como o constituído pelas atividades, disponibilização, manutenção e instalações necessárias à coleta, ao transporte, ao tratamento e à disposição final adequada dos esgotos sanitários (BRASIL, 2020). Essa lei estabelece metas de atendimento de 99% da população com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgotos até 2033.

A Resolução CONAMA n.º 430 de 2011 dispõem sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores. A resolução alega que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nessa Resolução e em outras normas aplicáveis (CONAMA, 2011).

Em âmbito estadual, a Lei complementar n.º 162 de 2016 institui a Política Estadual de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário no Ceará, institui o Sistema Estadual de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário, o Sistema Estadual de Informações em Saneamento, e cria o fundo Estadual de Saneamento (CEARÁ, 2016).

A Resolução COEMA n.º 2 de 2017 também dispõem de padrões e condições de lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras (CEARÁ, 2017). Já a lei estadual n.º. 16.033 de 2016 trata da política de reúso de água não potável (CEARÁ, 2016). As normas brasileiras utilizadas no dimensionamento das unidades estão dispostas no Quadro 01.

Quadro 01 - Normas utilizadas.

NBR	Descrição
12.209 de 2011	Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.
9.826 de 2008	Medição de vazão de líquido em canais abertos – Calhas Parshall.
12.209 de 1992	Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário.

7.229 de 1993	Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos.
13. 969 de 1997	Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação.
9.649 de 1986	Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário.

Fonte: Autor, 2023.

2.3 Métodos mais empregados para tratamento de esgotos domésticos no Brasil

As lagoas de estabilização constituem a técnica de tratamento de esgotos domésticos mais utilizada nos países em desenvolvimento, isso devido à simplicidade de seus processos e a elevada eficiência de remoção matéria orgânica, nutrientes e patógenos (PERÍGOLO, 2004). Além de que praticamente não demandam de energia elétrica e não requerem equipamentos eletromecânicos sofisticados (GEHLING, 2017).

Nestes sistemas de tratamento, o processo ocorre de forma natural mediante fenômenos bioquímicos, biológicos e físicos, onde uma ampla variedade de microrganismos transforma e degrada a matéria orgânica e os nutrientes. Devido isso, as lagoas de estabilização tornam-se sensíveis às condições climáticas, sendo a temperatura e a intensidade dos raios solares, fatores determinantes do sucesso do tratamento, uma vez que, regulam as atividades metabólicas dos organismos envolvidos nos processos, bem como, a velocidade da fotossíntese (BENTO, 2005).

Existem vários tipos de lagoas utilizadas para o tratamento de esgoto. As lagoas anaeróbias e facultativas são empregadas para a remoção de matéria orgânica carbonácea, enquanto as lagoas de maturação são utilizadas para reduzir a concentração de organismos patógenos (GEHLING, 2017).

Nas lagoas aeradas, utilizam-se equipamentos para fornecer oxigênio ao sistema e manter os sólidos em suspensão. As lagoas de estabilização são sempre antecedidas por tratamento preliminar, visando à remoção de sólidos grosseiros e areia (GEHLING, 2017).

Outro sistema bastante empregado atualmente, em nível mundial, para o tratamento de esgotos domésticos e industriais é o sistema de lodos ativados, ideal para situações no qual é necessária uma elevada qualidade do efluente e reduzidos requisitos de área. Entretanto, o sistema de lodos ativados exige um índice de mecanização maior que alternativas de tratamento, implicando em operações mais sofisticadas e em maiores consumos de energia (VON SPERLING, 1997).

A etapa biológica do tratamento com lodos ativados conta basicamente com três unidades: o tanque de aeração (reator), o tanque de decantação e a recirculação do lodo. No

reator ocorrem reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica e em certas condições, da matéria nitrogenada. A biomassa se desenvolve a partir do substrato presente no esgoto e é sedimentado no decantador, esse processo garante um efluente final clarificado. Os sólidos sedimentados no decantador são recirculados para o reator, aumentando as concentrações de biomassa, o que garante uma alta eficiência do sistema (VON SPERLING, 1997).

A tecnologia anaeróbia aplicada ao tratamento de esgotos domésticos também se consolidou no país, onde praticamente todas as análises alternativas de tratamento incluem os reatores anaeróbios, isso devido às diversas vantagens desse tipo de tratamento, tais como os baixos custos de implantação, operação e manutenção, a simplicidade operacional e a baixa produção de sólidos. Essas vantagens associadas com as características climáticas do Brasil tornam essa alternativa de tratamento ainda mais eficiente e atrativa (DA SILVA, 2007).

A remoção de nutrientes e patógenos ainda configura uma desvantagem das tecnologias anaeróbias de tratamento, bem como, o fato da demanda química de oxigênio residual ser, em geral, superior aos limites de emissão estabelecidos na legislação ambiental. Além da instabilidade dos reatores anaeróbios (AQUINO, 2005).

Dentre os processos anaeróbios para o tratamento de efluentes, o reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reator), também conhecido como RAMAL (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo) é amplamente utilizado no Brasil. Neste sistema, procura-se acelerar o processo de digestão criando condições favoráveis para a atividade dos microrganismos de decompor a matéria orgânica (PEREIRA, 2009).

O reator UASB é constituído basicamente por um tanque, no qual são acoplados na sua parte superior, um decantador e um defletor dos gases formados. O efluente a ser tratado é introduzido pelo fundo do reator e percorre em fluxo ascendente, onde o efluente tratado é descartado pelo topo do decantador. O efluente, inicialmente, atravessa uma camada de lodo biológico, onde ocorre a transformação da matéria orgânica em biogás. O defletor obriga o biogás a se dirigir a uma região isolada, dessa forma, apenas o líquido e uma parcela do lodo biológico em suspensão entram no decantador, onde ocorre a separação dos sólidos e esses retornam para o fundo do reator (DE SOUZA, 1986).

2.4 Sistemas alternativos de tratamento de esgoto para comunidades isoladas

2.4.1 *Wetlands* construídos

O termo *wetlands* é utilizado para caracterizar habitats naturais úmidos, que ficam parcialmente ou totalmente inundados durante o ano. As *wetlands* naturais podem ser reconhecidas como várzeas, igapós, pântanos, manguezais e outros (SALATI, 2001). Esses sistemas desempenham diversas funções no meio, se destacando pela capacidade de proteger as margens dos corpos d'água de ações erosivas, por regularizar o fluxo hidráulico e por reter e transformar nutrientes presentes na água (IAQUELI, 2016).

Um sistema *wetlands* funciona basicamente por gravidade, permeabilidade e degradação biológica (IAQUELI, 2016). Os *wetlands* construídos são sistemas controlados de tratamento de efluentes, alagados ou saturados, de matriz solo, plantas e microrganismos, que simulam e aceleraram as condições existentes em *wetlands* naturais, com capacidade de degradar a matéria orgânica e reciclar nutrientes (ZANELLA, 2008).

Esses sistemas atuam como tratamento secundário, devido seu potencial de decompor matéria orgânica por meio de reações bioquímicas, bem como, um tratamento terciário, por ser capaz de remover e controlar nutrientes (IAQUELI, 2016).

Nessa tecnologia de tratamento, utiliza-se o princípio de solo úmido cultivado, onde o solo e a zona de raízes das plantas, por meio de processos físicos, químicos e biológicos são responsáveis por despoluir águas residuárias, desempenhando funções semelhantes ao tratamento convencional dos esgotos domésticos (SILVA, 2007).

Nesses sistemas, os efluentes passam pelas zonas de raízes, que conta com a presença de inúmeras bactérias aeróbias hospedeiras em seu entorno. Essas bactérias recebem oxigênio atmosférico através de espaços internos ociosos das plantas, em condições favoráveis, essas bactérias são responsáveis por reduzir a carga orgânica do efluente e assim tratá-lo (SILVA, 2007).

O material filtrante, as macrófitas e os microrganismos são os principais elementos atuantes no tratamento de esgoto utilizando *wetlands* construídos. O material filtrante tem influência direta nos processos de filtração, adsorção e degradação microbiológica (OLIJNYK, 2008; RODRIGUES, 2021).

A finalidade do tratamento condiciona à escolha do material filtrante, com base no desempenho do material em termos de nitrificação, na sua vida útil e na sua condutividade hidráulica. A brita e a areia são os materiais mais utilizados como meio filtrante no mundo. A utilização de meios filtrantes alternativos pode oferecer vantagens no processo de remoção de poluentes específicos, como também, reduzir custos, porém, empregar materiais com características desconhecidas como meio filtrante pode resultar na colmatação do sistema (OLIJNYK, 2008; RODRIGUES, 2021).

O material filtrante deve manter boas condições de fluxo ao longo do tempo, sendo capaz de absorver compostos inorgânicos presentes nos efluentes, tais como amônia e ortofosfato (SEZERINO, 2006). Deve ser empregado diferentes materiais filtrantes no sistema, visto que, a qualidade da água muda no decorrer do processo, conseqüentemente, se faz necessário meios filtrantes com características distintas (MONTEIRO, 2009).

As macrófitas são plantas adaptadas morfológicamente e fisiologicamente para sobreviverem e se desenvolverem em ambientes saturados de água. As espécies escolhidas para integrar o sistema precisam apresentar tolerância a ambientes eutrofizados, crescimento acelerado, incorporação de nutrientes, manejo facilitado, serem esteticamente agradável, além de outras características fundamentais para suportar as condições expostas (MONTEIRO, 2009).

A *Phragmites australis*, A *Typha* spp. e a *Juncus* spp. são as macrófitas mais aplicadas nos sistemas *wetlands* de tratamento (PELLISSARI, 2013). As macrófitas facilitam a transferência de gases do sistema, estabilizam à superfície do leito, absorvem micronutrientes e micronutrientes, fornecem carbono biodegradável necessário para o processo de desnitrificação, atuam como isolante térmico, proporcionam habitats e agradável aspectos estéticos (BRASIL; MATOS; SOARES, 2007).

As macrófitas são classificadas segundo seu biótipo. As macrófitas emergentes são plantas enraizadas no sedimento, porém com folhas que ficam fora d'água, já as macrófitas aquáticas com folhas flutuantes são enraizadas no sedimento e apresentam folhas que ficam flutuando na superfície da água. As macrófitas aquáticas submersas enraizadas crescem totalmente submersas na água, enquanto as macrófitas aquáticas submersas livres tem rizóides pouco desenvolvidos e permanecem flutuando submergidas na água. Por fim, as macrófitas aquáticas flutuantes são aquelas que como o nome do grupo sugere, flutuam na superfície da água (ESTEVEES, 1998).

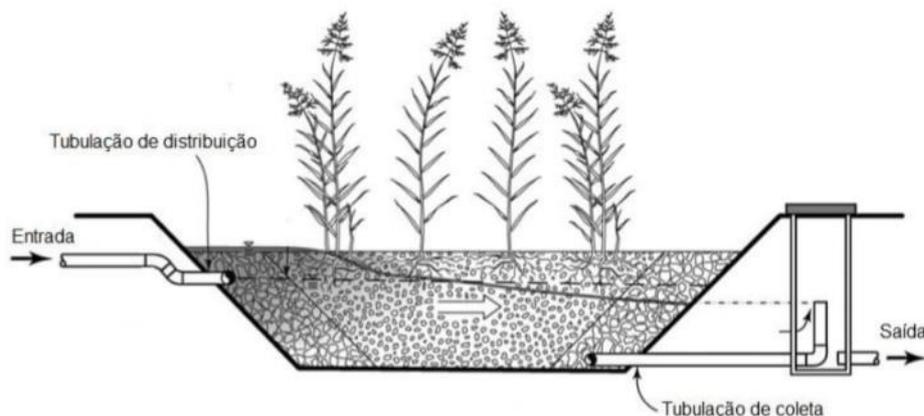
Os microrganismos que habitam os *wetlands* construídos, o grupo das bactérias é o mais representativo, sendo responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e pelas atividades nitrificantes. Além das bactérias, os protozoários e os micro metazoários também estão presentes no sistema e desempenham um papel fundamental no processo de tratamento, atuando como indicadores biológicos da eficiência do tratamento (OLIJNYK, 2008; SEZERINO, 2006). Estes microrganismos estão presentes tanto suspensos nos esgotos, quanto aderidos no meio filtrante. Além de estarem presentes nas raízes das plantas formando um biofilme (OLIJNYK, 2008; SEZERINO, 2006).

Existem alguns modelos de *wetlands* construídos, classificados de acordo com o nível d'água em relação ao leito, a direção do fluxo hidráulico e com o tipo de vegetação utilizada. Com base no nível de água em relação ao leito, os modelos se categorizam em superficial, sub superficial ou combinado. Nos modelos superficiais, a lâmina d'água é exposta ao ar atmosférico, ou seja, o nível da água se encontra acima do nível do leito, e nos sistemas sub superficiais, o nível da água é mantido abaixo do nível do leito (ZANELLA, 2008).

Nos sistemas combinados, parte do sistema funciona com fluxo superficial e parte com fluxo sub superficial (ZANELLA, 2008).

Nos sistemas horizontais, o efluente a ser tratado é disposto na porção inicial do meio filtrante, que devido a declividade do leito, percola no sentido horizontal para as outras porções do sistema, formando uma lâmina de água aparente (sistemas superficiais) ou não (sistemas sub superficiais) (MAGALHÃES, 2013; MONTEIRO, 2009), Figura 01.

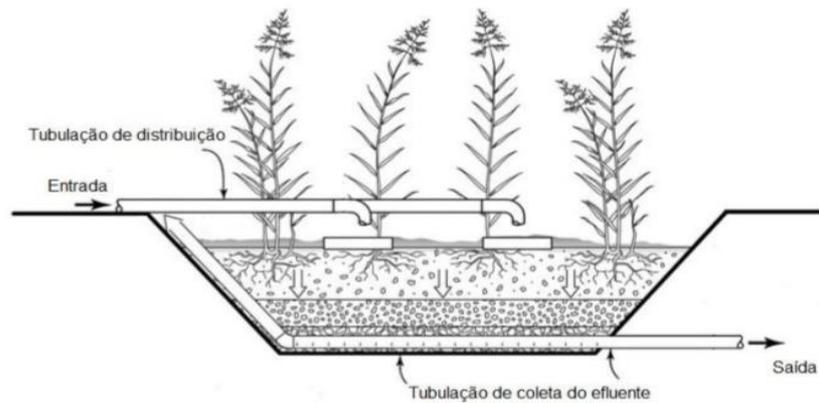
Figura 01 – *Wetlands* construído de fluxo horizontal.



Fonte: Magalhães Filho (2013).

Nos sistemas verticais, o efluente é introduzido por toda a parte superior do leito e percolado no sentido vertical ao longo do meio filtrante, como mostra a Figura 02. Nos sistemas de fluxo hidráulico vertical, o sentido pode ser ascendente ou descendente. Nos sistemas descendentes ocorre maior incorporação de oxigênio ao biofilme, devido à aplicação intermitente do efluente, de modo que, entre uma aplicação e outra, o líquido percola pelo reator, promovendo um grande arraste de oxigênio para o substrato (MAGALHÃES, 2013; MONTEIRO, 2009).

Figura 02 – *Wetlands* construído de fluxo vertical. Fonte: Magalhães Filho (2013).

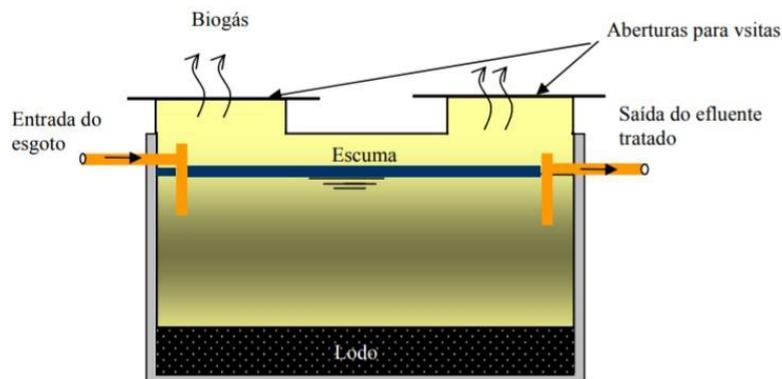


Os sistemas ascendentes não apresentam essa mesma eficiência de oxigenação do biofilme, em geral, o oxigênio disponível não é suficiente. O método construtivo dos sistemas horizontais é mais simplificado em relação aos verticais, onde o segundo necessita de um sistema de distribuição e coleta sobre toda a sua área, na parte superior e inferior, respectivamente (MAGALHÃES, 2013; MONTEIRO, 2009).

2.4.2 Fossa séptica seguido de filtro anaeróbio e reúso

As fossas sépticas, Figura 03, são câmaras convenientemente construídas para armazenar despejos domésticos e industriais, por um período definido, permitindo a sedimentação dos sólidos e retenção do material graxo contido nos esgotos, transformando-os em substâncias mais simples e estáveis (JORDÃO; PESSOA, 1975).

Figura 03 – Fossa séptica retangular de câmara única.



Fonte: Ávila (2005).

Os tanques sépticos podem ser de câmara única, de câmaras em séries ou de câmaras sobrepostas. O primeiro modelo é comumente utilizado para atender a residências e pequenos edifícios, enquanto os outros dois são empregados para tratar volumes maiores de esgotos, podendo ainda, ser construídas unidades conjugadas (CAMPOS, 2000).

A ABNT (1993) define tanque séptico como uma unidade cilíndrica ou prismática retangular de fluxo horizontal, para o tratamento de esgotos por processos de sedimentação, flotação e digestão. As fossas sépticas funcionam com base no processo de decantação dos sólidos sedimentáveis, que acabam se incorporando ao lodo biológico. As substâncias mais leves flutuam na camada superior do tanque, formando a chamada espuma.

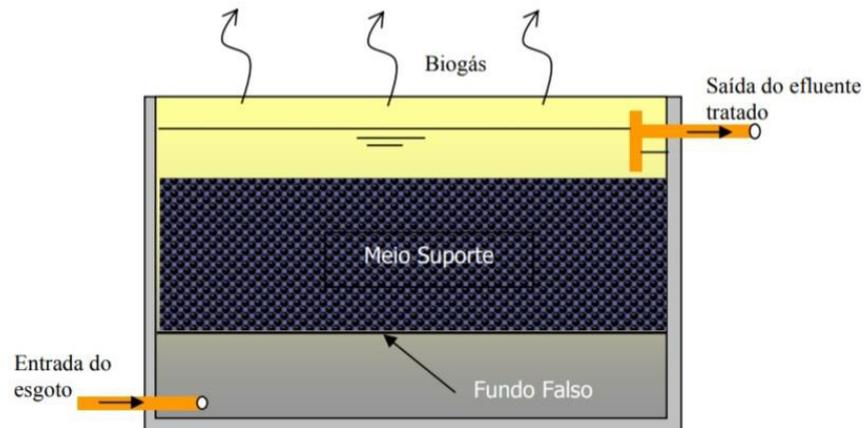
O efluente é direcionado ao tratamento secundário, visto que, apenas o tratamento no tanque séptico não é suficiente para um tratamento completo dos efluentes. Esse direcionamento é feito através de um dispositivo de saída, geralmente no lado oposto ao de entrada e logo abaixo da camada de espuma. O lodo decantado no fundo do tanque sofre um processo de decomposição anaeróbia e facultativa, que apesar dessa constante decomposição, existe um acúmulo contínuo de lodo ao longo dos meses de operação, sendo necessárias limpezas periódicas, para evitar que o volume útil do tanque seja comprometido pelo aumento do lodo (BACKES, 2017).

Apesar dos tanques sépticos não apresentarem alta eficiência, produz efluentes de qualidade razoável, mas que torna mais fácil o pós-tratamento. Além das vantagens por ser um tratamento anaeróbio, de operações simples e baixo custo. Essa alternativa pode anteceder diversos tipos de unidades de tratamento, tornando-se bastante vantajoso quando associadas com tratamentos que removem matéria orgânica dissolvida (CAMPOS, 2000).

Porém, as fossas sépticas são normalmente utilizadas como soluções individuais de tratamento de efluentes precedendo filtros anaeróbios (SOBRINHO; JORDÃO, 2001).

Os filtros anaeróbios, Figura 04 são, basicamente, tanques contendo leito de pedras ou outro material de enchimento. Os microrganismos se aderem e se desenvolvem na superfície de cada peça do material de enchimento, formando um biofilme, como também, agrupam-se em forma de flocos ou grânulos, nos espaços vazios do material de suporte do biofilme (CAMPOS, 2000).

Figura 04 – Filtro anaeróbio.



Fonte: Ávila (2005).

O fluxo dos esgotos pode ocorrer de forma ascendente ou descendente, através desses espaços vazios, permitindo que os microrganismos retidos no sistema realizem a bioconversão da matéria orgânica dos efluentes (CAMPOS, 2000).

Nos níveis mais baixos do leito, quando o fluxo é ascendente, ocorrem as maiores taxas de remoção de substrato, sendo que nessa região há grandes concentrações de substrato e de sólidos biológicos, isso devido o arraste desses, no mesmo sentido do fluxo. A maior parte dos filtros anaeróbios são de fluxo ascendente, com leito de brita no tamanho apropriado, porém, outros materiais podem ser utilizados como suporte, tais como anéis, esferas perfuradas, blocos modulares e outros (CAMPOS; DIAS, 1989).

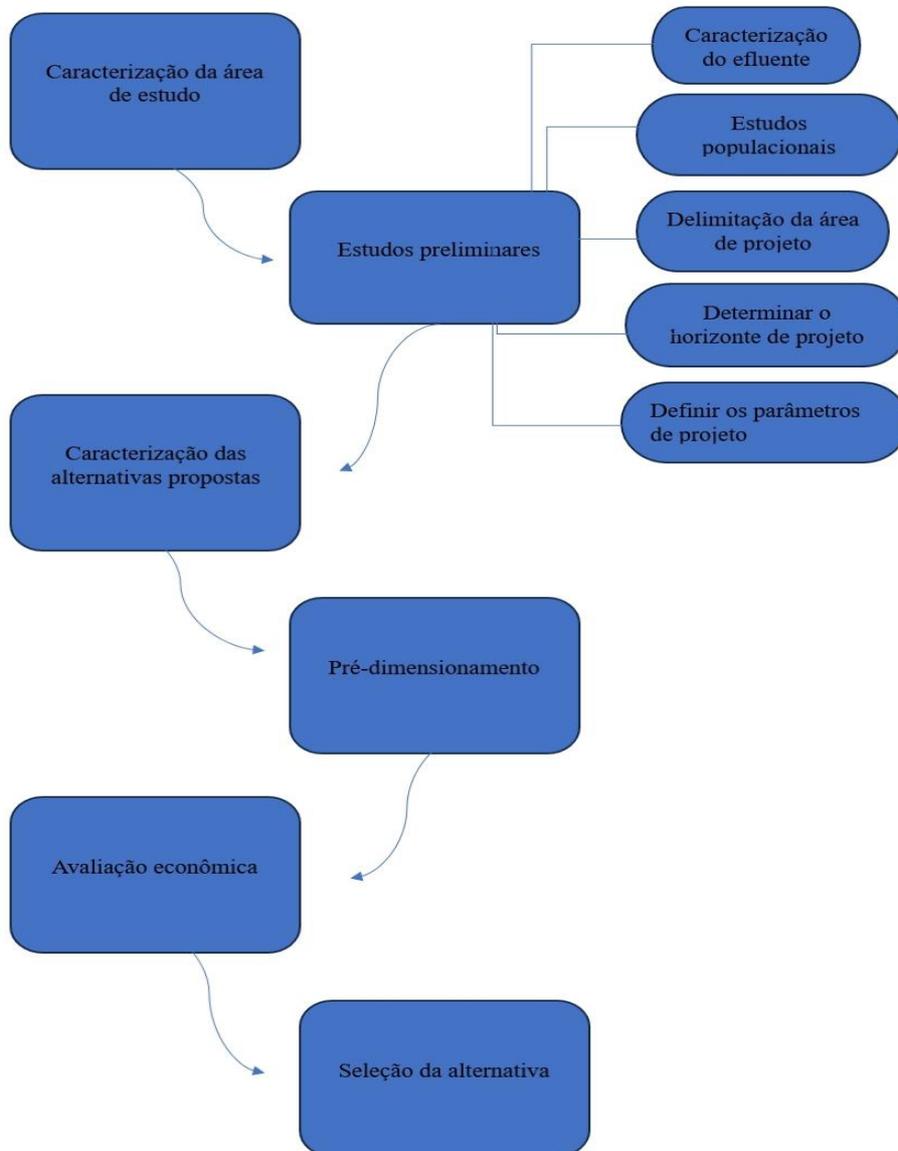
A resistência estrutural, a inércia química e biológica, elevadas áreas específicas e porosidade, resistência à colmatação e o baixo preço são alguns dos requisitos necessários para a escolha do material de suporte (FLECK, 2003).

Os filtros podem atuar como unidade principal do tratamento, mas, não como pré-tratamento, isso devido a grande quantidade de sólidos suspensos dos esgotos brutos, podendo haver obstrução dos espaços vazios do material de suporte. Portanto, são mais empregados para a remoção da matéria orgânica dissolvida, procedendo a reatores que removem sólidos em suspensão. Embora os sistemas que associam fossas sépticas e filtros anaeróbios sejam amplamente utilizados para tratar pequenas vazões de efluentes, esses também são capazes de tratar vazões médias, principalmente quando projetados em módulo (CAMPOS, 2000).

3 METODOLOGIA

Esse estudo caracteriza-se quanto ao objetivo, como uma pesquisa exploratória, descritiva e explicativa. Quanto à natureza, classifica-se como uma pesquisa aplicada, buscando utilizar os resultados obtidos na resolução do problema. No que se refere à abordagem do problema, trata-se de uma pesquisa qualitativa. Os dados foram coletados mediante os seguintes instrumentos: coletas bibliográficas, coletas documentais e da técnica de observação (GIL, 1996; SILVA; URBANESKI, 2009). A Figura 05 esboça a metodologia desse projeto.

Figura 05 – Delineamento metodológico.

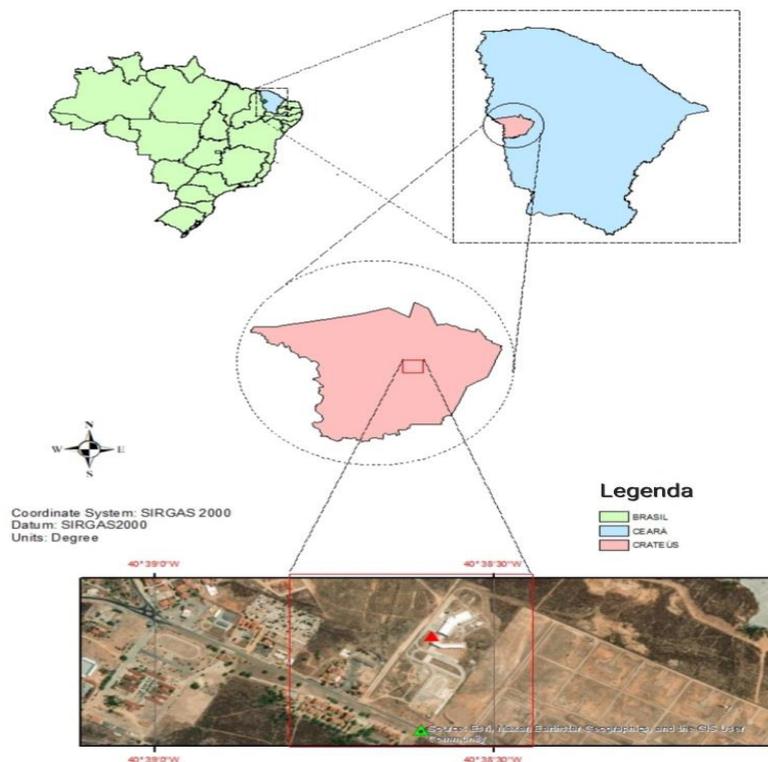


Fonte: Autor, 2023.

3.1 Caracterização da área de estudo

A Universidade Federal do Ceará (UFC), campus de Crateús, está localizada na Av. Professora Machadina Lima, com acesso pela BR 226. O campus conta com dois blocos na sua estrutura atual, um de atribuições administrativas e um de atribuições acadêmicas. As atividades acadêmicas da instituição tiveram início no segundo semestre de 2014 e atualmente são ofertados cinco cursos de graduação, esses na área de computação e engenharia. Atualmente, o campus conta com 116 funcionários, incluindo os departamentos terceirizados e, possui 824 alunos matriculados, informações obtidas com a prefeitura e a diretora do Campus. A Figura 06 mostra a localização do Campus de Crateús.

Figura 06 – Localização do Campus de Crateús.



Fonte: Adaptado de Silva, 2022.

O abastecimento de água na faculdade é ofertado pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará. O campus dispõe de três poços profundos, que são utilizados em eventuais situações de falhas na distribuição da Cagece e frequentemente na irrigação das áreas verdes. Atualmente, a universidade não conta com nenhum sistema de tratamento operante, apenas com fossas rudimentares.

O consumo médio mensal de água para fins não potáveis no Campus nos meses com ocorrência de aulas é de 237.415 litros (SALES; BATISTA, 2020). Segundo um estudo realizado no Campus, a quantidade de água demandada para irrigação das áreas verdes é de 48.047,07 litros por mês, o que equivale à 17,41% do consumo médio mensal de água no Campus (BEZERRA et al, 2020).

Em Crateús o clima é tropical quente semiárido, com temperatura média anual de 26° a 28° (°C). O período chuvoso é de janeiro a abril, com índice pluviométrico médio anual de 731,2 mm (IPECE, 2017).

Os solos predominantes na região “Sertões de Crateús”, são: Areias Quartzosas Distróficas, Bruno não Cálcico, Latossolo Vermelho – Amarelo, Planossolo Solódico e Podzólico Vermelho – Amarelo (IPECE, 2017). Os resultados de uma análise granulométrica caracterizaram uma amostra de solo de um campo experimental da universidade como granular, mal graduado, com cerca de 6,1% de material fino, sendo classificado como siltosa. Já os ensaios de consistência e limite de plasticidade resultaram em um índice de plasticidade nulo, reforçando um comportamento de solo arenoso e não plástico (MARTINS, 2022).

Um levantamento florístico realizado no Campus, que apresenta uma área urbanizada de 30,23 ha, pertencente ao complexo da Caatinga Arbustiva Aberta, Carrasco, Floresta caducifólia Espinhosa e a Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial, identificou um total de 26 espécies pertencentes a 25 gêneros e 17 famílias botânicas, em sua maioria, nativas do Brasil, demonstrando uma diversidade média na variedade de espécies com base no índice de Shannon (SILVA; FRANCA, 2020).

3.2 Estudos preliminares

3.2.1 Caracterização do efluente

Os efluentes gerados na universidade compreendem, em sua maioria, esgotos domésticos resultantes dos banheiros e do restaurante universitário, mas, conta também, com uma pequena parcela de efluentes químicos, devido às atividades desenvolvidas nos laboratórios de química, uma vez que, a universidade não conta com nenhum sistema de separação preliminar dos efluentes.

Com base em informações obtidas no laboratório, as substâncias químicas utilizadas nos experimentos são devidamente dispostas, onde parte dessas são armazenadas e conduzidas para um descarte especial por uma empresa especializada, o que resulta em

concentrações mínimas de resíduos químicos nos efluentes da universidade, garantindo a eficiência do tratamento utilizando, apenas, soluções para esgotos domésticos. Mesmo assim foram analisadas as características do efluente já caracterizado em estudo realizado pela prefeitura do campus.

3.2.2 Estudos populacionais, período e área de projeto

As projeções populacionais para fim de projeto foram realizadas considerando o ingresso de 250 alunos todos os anos, um índice de evasão média de 10% por semestre e o egresso de 30 alunos por ano, informações obtidas nos relatórios de atividades e gestão acadêmica do campus de Crateús dos anos de 2021 e 2022.

Desse modo, presume-se um crescimento proporcional ao dos últimos anos no campus. Tendo em vista que a estrutura do campus não foi finalizada e que se pretende expandir os cursos ofertados, a população de fim de projeto considerada conta com um incremento de 50% em cima dos números estimados para 2044.

A área de projeto compreende toda a área na qual o campus da UFC está inserido em Crateús e o horizonte dos eventos será de 20 anos, com início em 2024.

3.2.3 Parâmetros de projeto

Para determinar as concentrações per capita de esgoto, utilizou-se a recomendação diária indicada pela NBR 13969 (ABNT, 1997), para os cálculos das vazões adotou-se o coeficiente de retorno igual a 0,8 ($C=0,8$) e os coeficientes de variação de demanda K_1 e K_2 de 1,2 e 1,5 respectivamente, como o indicado pela NBR 9649 (ABNT, 1986). O valor referente à carga orgânica em termos de concentração de DBO_5 foi determinado com base em um estudo de caracterização dos efluentes da universidade. Já as vazões de projeto foram calculadas a partir das fórmulas do Quadro 02.

Quadro 02 – Vazões de projeto.

Vazões de projeto	Equações
Vazão máxima ($Q_{m\acute{a}x}$)	$Q_{m\acute{a}x} (L/s) = (C \times P \times q \times K_1 \times K_2) / 86400$
Vazão média ($Q_{m\acute{e}d}$)	$Q_{m\acute{e}d} (L/s) = (C \times P \times q) / 86400$
Vazão mínima ($Q_{m\acute{i}n}$)	$Q_{m\acute{i}n} (L/s) = Q_{m\acute{e}d} / 2$
Onde, C: Coeficiente de retorno; P: População; q: Contribuição per capita; K_1 e K_2 : Coeficientes de variação de demanda.	

Fonte: Adaptado da NBR 9649 (ABNT, 1986).

3.3 Caracterização das alternativas propostas

Para o projeto foram consideradas duas alternativas de tratamento de esgotos sanitários para comunidades isoladas. Um sistema composto por uma fossa séptica seguido de um filtro anaeróbio e reúso na irrigação das áreas verdes e, um sistema wetlands francês adaptado ao clima subtropical. Esse modelo de *wetlands* foi escolhido com base nos resultados do estudo do Silva (2022), que concluiu que o modelo francês é o mais indicado para a região, visto sua alta eficiência na remoção de parâmetros orgânicos e nutrientes, assim como, pelo histórico de experiências satisfatórias registradas em climas tropicais.

Essas duas alternativas foram escolhidas mediante um longo período de análise, que considerou essas opções de tratamento de efluentes, como as mais passíveis de aplicação no Campus.

3.4 Dimensionamentos

Ambos os sistemas contam com uma unidade de tratamento preliminar que foi dimensionada segundo o indicado na NBR 12.209 (ABNT, 2011) e na NBR ISO 9826 (ABNT, 2008). As equações de 01 à 05 foram utilizadas para dimensionar a grade, enquanto que as equações de 06 à 10 foram necessárias para dimensionar o desarenador.

- Eficiência da grade:

$$E = \frac{a}{t + a} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde, E: Eficiência da grade (%)

a: Espaçamento entre as barras (mm)

T: Espessura das barras (mm).

- Área útil:

$$Au = \frac{Q_{\text{máx}}}{V} \quad (\text{Equação 02})$$

Onde, Au: Área útil (m²);

Q_{máx}: Vazão máxima (m³/s);

V: Velocidade (m/s).

- Seção junto à grade:

$$S = \frac{Au}{E} \quad (\text{Equação 03})$$

Onde, S: Seção junto à grade (m²)

Au: Área útil (m²);

E: Eficiência.

- Largura do canal:

$$L = \frac{S}{hmáx} \quad (\text{Equação 04})$$

Onde, L: Largura do canal (m);

S: Seção junto à grade (m²);

H_{máx}: Altura máxima(m).

- Número de barras:

$$Nb = \frac{L - a}{t + a} \quad (\text{Equação 05})$$

Onde, Nb: Número de barras;

L: Largura do canal (mm)

A: Espaçamento entre as barras (mm)

T: Espessura das barras (mm).

- Área superficial:

$$A = \frac{Qmáx}{Vs} \quad (\text{Equação 06})$$

Onde, A: Área superficial (m²);

Q_{máx}: Vazão máxima (m³/s);

V_s: Velocidade de sedimentação (m/s).

- Comprimento com 50% de folga:

$$L' = 1,5 \times \frac{Qmáx}{b \times Vs} \quad (\text{Equação 07})$$

Onde, $Q_{\text{máx}}$: Vazão máxima (m^3/s);

B: Largura (m);

V_s : Velocidade de sedimentação (m/s).

- Profundidade:

$$h = V_s \times \left(\frac{L'}{Vh} \right) \quad (\text{Equação 08})$$

Onde, h: Profundidade (m);

V_s : Velocidade de sedimentação (m/s);

L' : Comprimento (m);

Vh : Velocidade do fluxo (m/s).

- Tempo de sedimentação:

$$t = \frac{h}{V_s} \quad (\text{Equação 09})$$

Onde, t: Tempo de sedimentação (s);

H: Profundidade (m);

V_s : Velocidade de sedimentação (m/s).

- Altura do depósito de areia:

$$h' = 0,1 \times h \quad (\text{Equação 10})$$

Onde, h' = Altura do depósito de areia (m);

H = Profundidade do desarenador (m).

Os critérios de dimensionamento foram adotados conforme a NBR 12.209 (ABNT, 1992). O dimensionamento da fossa séptica seguiu as orientações da NBR 7229 de 1993 e foram aplicadas às equações 11 a 14 para os cálculos.

- Volume útil:

$$V = 1000 + N \times (C \times T + K \times Lf) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde, V: Volume útil (L);

N: População (hab);
 C: Contribuição per capita (L/hab.dia);
 T: Tempo de detenção (dia);
 K: Taxa de acumulação de lodo (dia);
 Lf: Contribuição de lodo fresco (L/h.dia).

- Área útil:

$$A = \frac{V}{h} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde, A: Área útil (m²);
 V: Volume útil (m³);
 H: Profundidade (m).

- Largura interna:

$$L = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde, L: Largura interna (m);
 A: Área útil (m²).

- Comprimento:

$$C = 2 \times L \quad (\text{Equação 14})$$

Onde, C: Comprimento (m);
 L: Largura (m).

- Volume útil:

$$V = 1,6 \times N \times C \times T \quad (\text{Equação 15})$$

Onde, V: Volume útil (L);
 N: População (hab);
 C: Contribuição per capita (L/hab.dia);
 T: Tempo de detenção hidráulica (dia).

Já o dimensionamento do filtro anaeróbico, teve embasamento na NBR 13969 de 1997 e foram empregadas as equações 12 à 15 no dimensionamento. As características do dimensionamento e dos elementos constituintes do sistema wetlands francês foram baseadas

no documento de informações sobre o dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil, elaborado por Von Sperling e Sezerino (2018).

- Carga de DBO do esgoto Bruto:

$$CDBO = Q_{\text{éd}} \times \text{ConDBO} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde, CDBO: Carga de DBO (g/d);

$Q_{\text{éd}}$: Vazão média (m³/d);

ConDBO: Concentração de DBO (g/m³).

- Área requerida:

$$Ar = \frac{CDBO}{T_{\text{aos}}} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde, Ar: Área requerida (m²);

CDBO: Carga de DBO (g/d);

T_{aos} : Taxa de aplicação orgânica superficial (gDBO/m².d).

- Taxa de aplicação hidráulica superficial:

$$T_{\text{ahs}} = \frac{Q_{\text{éd}}}{Ar} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde, T_{ahs} : Taxa de aplicação hidráulica superficial (m³/m².d);

$Q_{\text{éd}}$: Vazão média (m³/d);

Ar: Área requerida (m²).

- Dimensões:

$$C = \sqrt{Ar} \quad (\text{Equação 19})$$

$$C = L \quad (\text{Equação 20})$$

Onde, C: Comprimento (m);

Ar: Área requerida (m²);

L: Largura (m).

- Carga de DBO afluente:

$$CDBOa = CDBO \times \left(1 - \frac{efi}{100}\right) \quad (\text{Equação 21})$$

Onde, CDBOa: Carga de DBO afluente (g/d);

CDBO: Carga de DBO (g/d);

efi: Eficiência de remoção de DBO no primeiro estágio (%).

Para o dimensionamento dos módulos do 1º estágio utilizou-se as equações de 16 a 20, já para o dimensionamento dos módulos do 2º estágio recorreu-se as equações de 17 à 21. As modelagens dos sistemas foram realizadas a partir do software Revit (2024), detalhando cada componente dos sistemas.

3.5 Avaliação econômica

Para a elaboração do plano orçamentário de cada alternativa de tratamento, foi necessária uma estimativa de custos de materiais e mão de obra através da tabela de custos da Seinfra-CE, atualizada em 2023.

3.6 Seleção da alternativa

Para a seleção da alternativa de tratamento mais viável, foi utilizada uma matriz de decisão desenvolvida por Ciolletti, et al (2018), onde alguns critérios foram ponderados, com pesos de 1 a 5, referente ao seu grau de importância, Quadro 03.

Quadro 03 – Critérios de seleção da alternativa.

Critérios	Peso
Custo de implantação	4
Custo de operação e manutenção	5
Dificuldade técnica de manutenção e operação	4
Eficiência na remoção dos poluentes	5
Economia de água e energia	3
Possibilidade de aproveitamento final do efluente	1
Formalização acadêmica e confiabilidade das informações	3

Fonte: Adaptado de Ciolletti, et al (2018).

Em seguida, cada alternativa de tratamento foi pontuada de acordo com sua eficiência referente a cada critério, com base no Quadro 04. Por fim, realizou-se um produto da pontuação pelos pesos de cada critério. Com isso, cada alternativa de tratamento teve uma avaliação numérica final, utilizada para definir o melhor tratamento para a universidade.

Quadro 04 – Critérios de seleção e suas respectivas pontuações.

Critérios	Pontuação	Eficiência
Custo de implantação	1	Alto
	3	Médio
	5	Baixo
Custo de operação e manutenção	1	Alto
	3	Médio
	5	Baixo
Dificuldade técnica de manutenção e operação	1	Difícil
	3	Médio
	5	Fácil
Eficiência na remoção dos poluentes	1	Baixa
	3	Média
	5	Alta
Economia de água e energia	1	Baixa
	3	Média
	5	Alta
Possibilidade de aproveitamento final do efluente	1	Baixa
	3	Média
	5	Alta
Formalização acadêmica e confiabilidade das informações	1	Baixa
	3	Média
	5	Alta

Fonte: Adaptado de Ciolletti, et al (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estimativa populacional

Estima-se que em 2044, 1855 alunos estarão com matrículas ativas no Campus, como não houve mudanças significativas no número de funcionários nos últimos anos, acredita-se que a universidade ainda terá em torno de 116 colaboradores nesse período. O Quadro 05 mostra a estimativa do número de alunos ativos temporalmente.

Quadro 05 – Estimativa do número de alunos matriculados por ano.

Ano	2024	2030	2036	2040	2044
Nº de alunos matriculados	1074	1484	1703	1806	1855

Fonte: Autor, 2023.

A população de fim de projeto adotada foi de 3.000 contribuintes, considerando o número de alunos estimado para 2044 mais a quantidade de funcionários atual e um incremento de 50%, tendo em vista a expansão do campus e a oferta de novos cursos ao longo dos 20 anos.

4.2 Vazões de projeto

As vazões de projeto foram obtidas com base nas equações dispostas na NBR 9649 (ABNT, 1986), e os coeficientes de retorno e de variação de demanda. Já a contribuição per capita de esgoto adotada foi de 50 L/hab.dia, indicado para escolas e locais de longa permanência pela NBR 13969 (ABNT, 1997). Os resultados estão expostos no Quadro 06.

Quadro 06 – Vazões de projeto calculadas.

Vazões de projeto	Fórmulas aplicadas	Resultados obtidos
Vazão máxima (Q _{máx})	$Q_{máx} = (C \times P \times q \times K1 \times K2) / 86400$	2,50 L/s
Vazão média (Q _{méd})	$Q_{méd} = (C \times P \times q) / 86400$	1,39 L/s
Vazão mínima (Q _{mín})	$Q_{mín} = Q_{méd} / 2$	0,69 L/s
Onde, Coeficiente de retorno (C) = 0,8; População (P) = 3000; Contribuição per capita (q) = 50 L/hab.dia e os coeficientes de variação de demanda (K1 e K2) = 1,2 e 1,5.		

Fonte: Autor, 2023.

4.3 Dimensionamento

Todos os cálculos necessários para os dimensionamentos estão descritos no memorial de cálculo, Apêndice “A” desse trabalho.

4.3.1 Dimensionamento da estação de tratamento preliminar

O tratamento preliminar é constituído por uma unidade de gradeamento, um desarenador e uma calha Parshall, Figura 07.

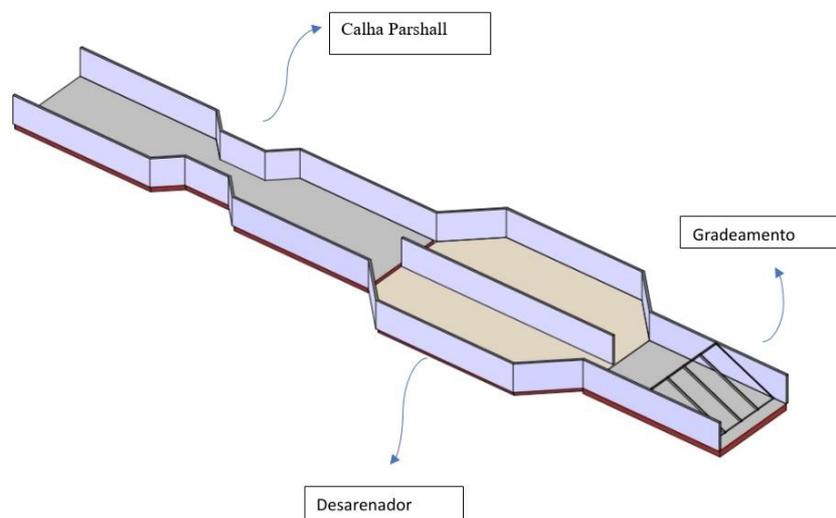


Figura 07 – Unidade de tratamento preliminar.

Fonte: Autor, 2023.

Foi adotada uma grade com três barras de espessura de 10 mm e espaçamento entre elas de 18,5 mm. Espera-se uma eficiência de 65% da grade. O desarenador tem 0,3 m de comprimento por 0,6 m de largura, com um depósito de areia de 0,002 m de altura. Adotou-se uma calha Parshall com garganta de 3". As dimensões da unidade preliminar estão apresentadas no Quadro 07.

Quadro 07 – Dimensões da unidade preliminar de tratamento.

Grades	
Espessura	10 mm
Espaçamento entre as barras	18,5 mm
Área útil	0,004 m ²
Área de seção junto à grade	0,006 m ²
Largura do canal	0,107 m
Número de barras	3 barras
Eficiência	65%
Desarenador	
Área superficial	0,119 m ²
Largura útil	0,6 m
Comprimento	0,3 m
Tempo de sedimentação	0,66 s
Altura do depósito de areia	0,002 m
Calha parshall	
Largura da garganta	3''

Fonte: Autor, 2023.

4.3.2 Dimensionamento da fossa séptica e do filtro anaeróbico

O dimensionamento da fossa séptica foi fundamentado nas instruções da NBR 7229 (ABNT, 1993). Adotou-se uma contribuição diária de esgoto de 50 litros por pessoa, no qual é indicado para escolas e locas de longa permanência. Adotou-se também um período de detenção de 0,5 dias, uma taxa de acumulação de lodo de 97 dias, considerando intervalos de dois anos entre as limpezas e, uma contribuição diária de lodo fresco de 0,2 litros por pessoa.

Devido o grande volume, optou-se por utilizar duas fossas sépticas retangulares em séries com as dimensões apresentadas no Quadro 08.

Quadro 08 – Dimensões das fossas sépticas.

Fossa séptica	
Volume útil	67 m ³
Profundidade útil	2,8 m
Largura interna	3,5 m
Comprimento interno	7m

Fonte: Autor, 2023.

Da mesma forma que ocorreu com as fossas, devido o volume ser bastante elevado, preferiu-se utilizar dois filtros retangulares nas dimensões expostas no Quadro 09.

Quadro 09 – Dimensões dos filtros anaeróbios.

Filtro anaeróbio	
Profundidade útil	2,8 m
Volume útil	60 m ³
Largura interna	3,3 m
Comprimento interno	6,6 m

Fonte: Autor, 2023.

4.3.3 Dimensionamento do sistema *wetlands* francês

Para o dimensionamento do sistema *wetlands* adotou-se uma concentração de DBO do esgoto bruto de 418 g/m³, segundo um estudo de caracterização dos efluentes do campus e, uma taxa de aplicação orgânica superficial de 150 gDBO/m².d para o primeiro estágio e de 20 gDBO/m².d para o segundo estágio. Assim como as taxas de aplicação orgânicas superficiais, os dimensionamentos dos dois estágios do sistema *wetlands* francês foi conforme o manual de dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil (VON SPERLING; SEZERINO, 2008).

Os módulos do 1º estágio são quadrados com dimensões de 2,4 m de largura por 2,4 m de comprimento, já os módulos do 2º estágio também são quadrados, mas com

dimensões de 2,1 m de largura por 2,1 m de comprimento. O Quadro 10 mostra os resultados dos dimensionamentos dos módulos *wetlands*.

Quadro 10 – Dimensões dos módulos dos *wetlands*.

1° estágio	
Carga de DBO do esgoto bruto	836 g/d
Área superficial requerida	5,6 m ²
Taxa de aplicação hidráulica superficial	0,359 m ³ /m ² .dia
Largura	2,4 m
Comprimento	2,4 m
2° estágio	
Carga de DBO afluyente	83,6 g/dia
Área superficial requerida	4,2 m ²
Taxa de aplicação hidráulica superficial	0,478 m ³ /m ² .dia
Largura	2,1 m
Comprimento	2,1 m

Fonte: Autor, 2023.

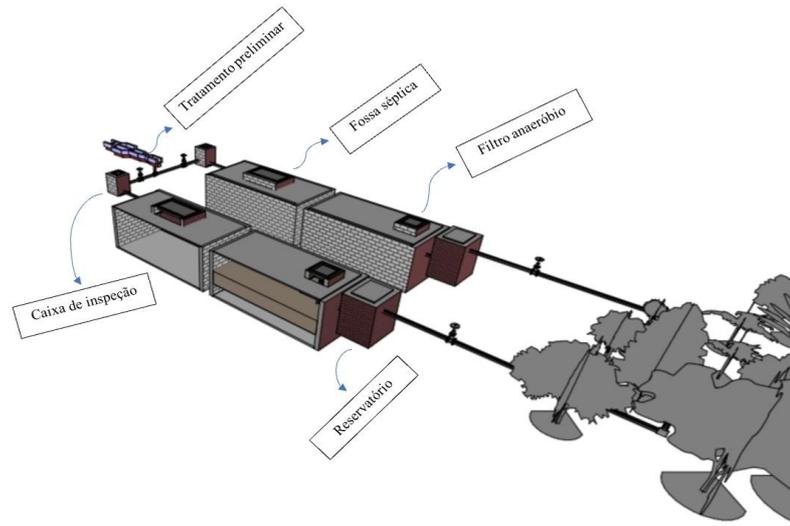
4.4 Caracterização dos sistemas propostos

4.4.1 Fossa séptica seguida de um filtro anaeróbio e reúso na irrigação das áreas verdes

Esse sistema conta com uma etapa preliminar de tratamento composta por uma unidade de gradeamento, um desarenador e uma calha Parshall. Depois do tratamento preliminar, os efluentes passam pelas caixas de inspeções (1 x 1 x 1,3 m) e seguem para as fossas sépticas e em seguida para os filtros anaeróbios. No fim do tratamento, os efluentes são armazenados nos reservatórios semienterrados (1,6 x 2 x 2 m) que são enviados através de tubulações de PVC para as áreas verdes e dispersados através de sprinkler, Figura 08.

Todos as componentes do sistema são de alvenaria, a base de tijolos cerâmicos e revestimento impermeabilizante. As tubulações e os acessórios utilizadas são de PVC DN 100 mm. Nos filtros, o meio filtrante utilizado foi uma camada de 0,6 m de pedra britada N° 4, já o fundo falso tem 0,2 m de espessura, com vazamentos de 0,025 m de diâmetro com espaçamento de 0,15 m entre eles.

Figura 08 – Configuração do sistema fossa séptica seguido de filtro anaeróbio e reúso.



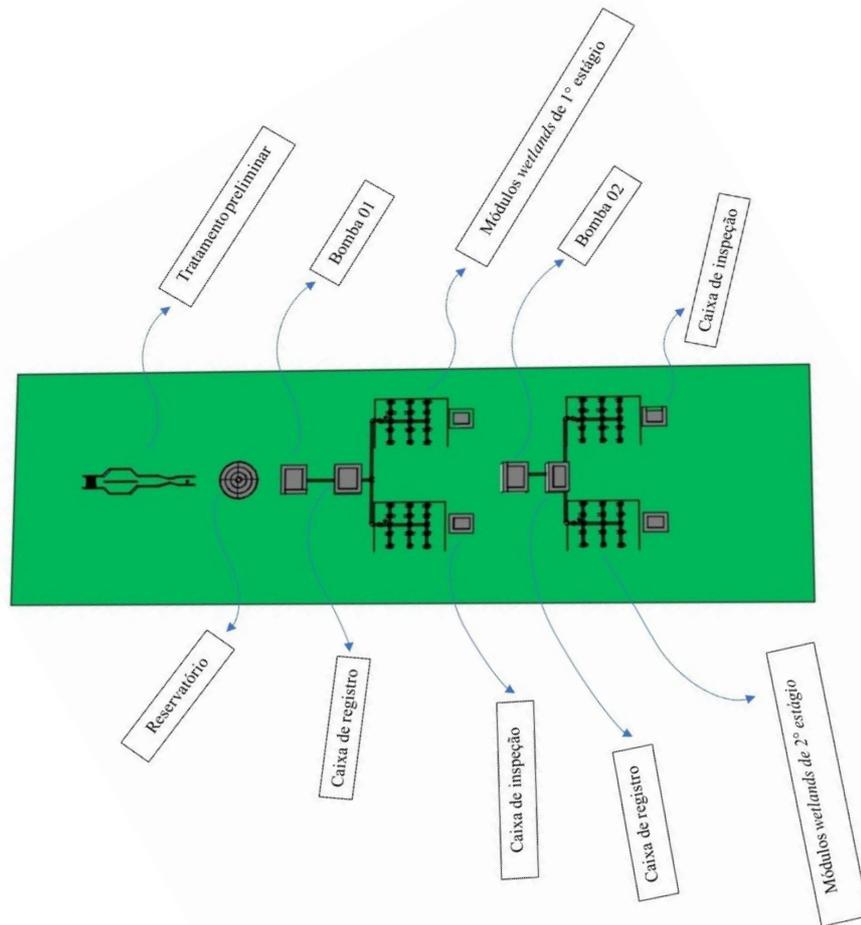
Fonte: Autor, 2023.

4.4.2 *Wetlands* francês adaptado ao clima subtropical

Para o sistema *wetlands* francês adaptado à climas tropicais foram projetados quatro módulos com fluxo vertical, sendo dois leitos do primeiro estágio e dois do segundo estágio. Os leitos atuam de forma alternada em relação ao período de alimentação e repouso. Na concepção para climas quentes, adota-se 3,5 dias de alimentação e 3,5 dias de descanso, completando um ciclo de sete dias.

O sistema conta com quatro caixas de inspeção (1 x 1 x 1 m), duas caixas de concreto para acomodação das bombas (1,4 x 1 x 1,7 m) e duas caixas de concreto para os registros (1,4 x 1 x 0,5 m). O projeto conta também com uma unidade de tratamento preliminar e uma de armazenamento. A Figura 09 ilustra a configuração do sistema *wetlands* proposto.

Figura 09 – Configuração do sistema *wetlands* francês.



Fonte: Autor, 2023.

Para determinar o volume da unidade de armazenamento, foi realizada uma razão entre a vazão diária (m^3/d) pelo volume de cada batelada (aplicações diárias). O número de bateladas diárias adotadas no projeto foi de 12, que equivale a uma batelada a cada duas horas. Nesse caso, tem-se que o volume por batelada corresponde a $10,1 m^3$.

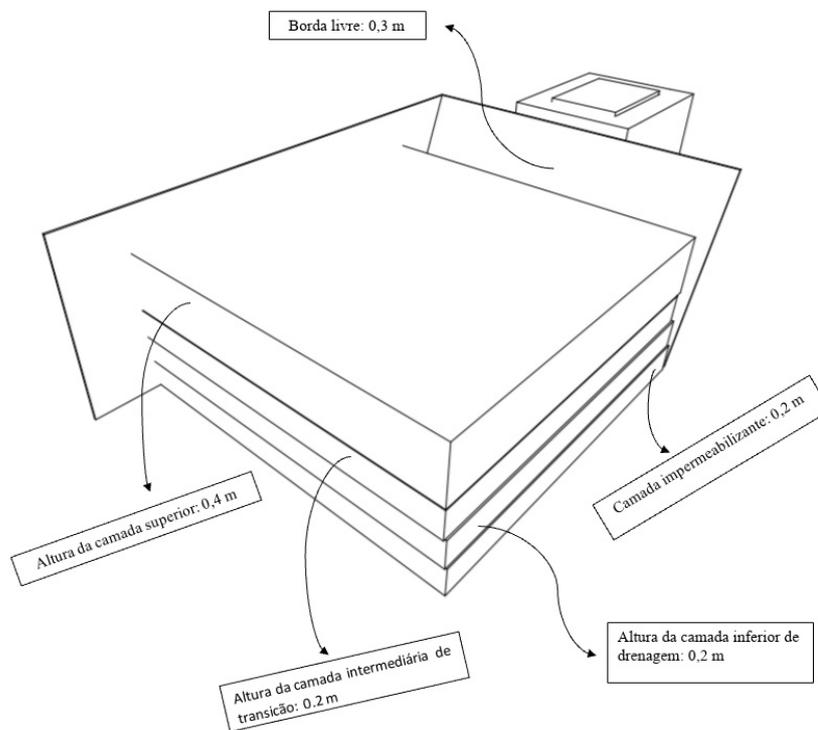
Conforme os modelos de reservatórios disponíveis no mercado, adotou-se para o projeto uma unidade de armazenamento de polietileno com capacidade de $15 m^3$. A instalação

e manutenção dos reservatórios deverão ser realizadas segundo as orientações do manual do fabricante.

As bombas responsáveis pelas bateladas foram dimensionadas com base na vazão durante a aplicação, calculadas pelo produto entre a taxa de aplicação hidráulica instantânea e a área do leito em operação. Para o primeiro estágio, adotou-se uma taxa de aplicação hidráulica instantânea de $0,6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, resultando em uma vazão de aplicação de $3,4 \text{ m}^3/\text{h}$. Já para o segundo estágio, a taxa de aplicação hidráulica instantânea indica é de $0,36 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, o que resultou em uma vazão de aplicação de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Mediante os critérios, optou-se por duas bombas centrífugas modelo Schneider BC 98.

Os módulos de 1º e 2º estágio tem altura total de 1,3 m, segmentados em camadas com espessuras expostas na Figura 10.

Figura 10 – Altura das camadas constituintes dos leitos filtrantes dos *wetlands*.

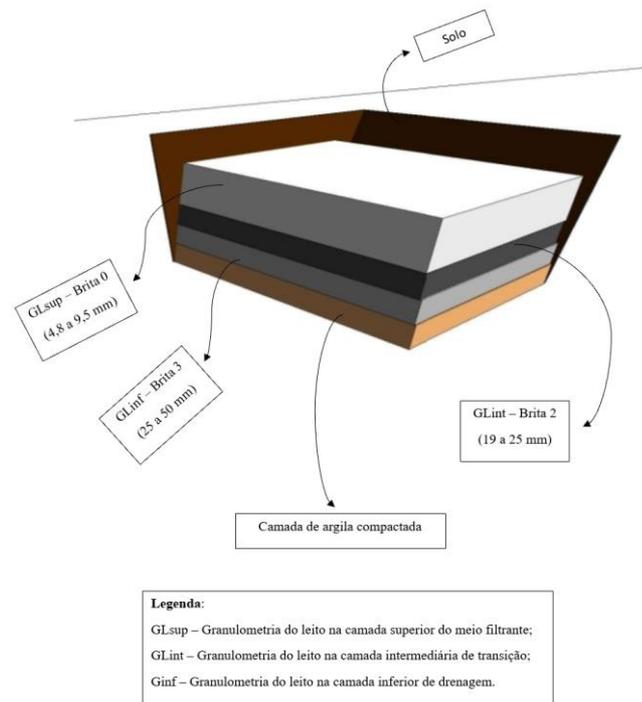


Fonte: Autor, 2023.

A escolha dos materiais filtrantes e suas granulometrias foi determinada em função de suas disponibilidades, custos e recomendações literárias. As camadas do meio filtrante são

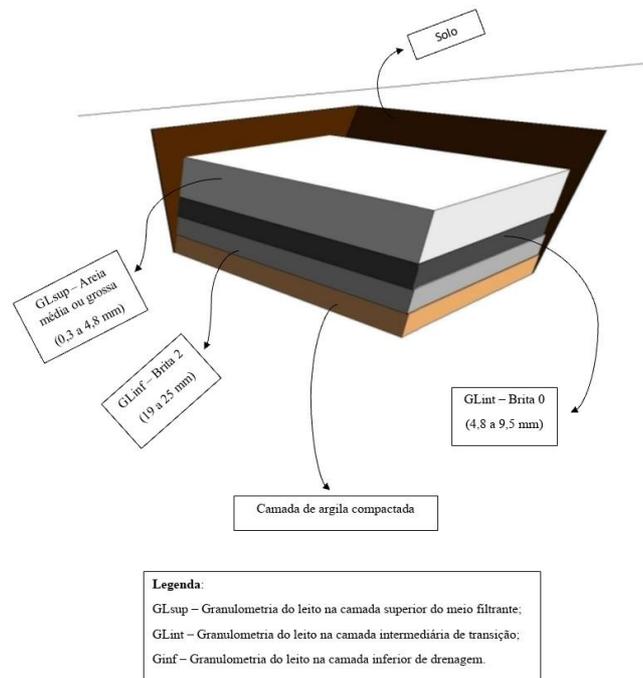
dispostas de forma ascendente, em ordem decrescente de granulometria, como mostra as Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Composição das camadas do leite filtro dos módulos do 1º estágio.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 12 – Composição das camadas do leite filtrante dos módulos do 2º estágio.



Fonte: Autor, 2023.

Em função das características do solo e da profundidade do lençol freático, optou-se por módulos escavados, com taludes com inclinação (Z) 2:1 e com inclinação do fundo de 1%. Para assegurar a estanqueidade do sistema, evitando a percolação de efluentes no lençol freático é necessário a impermeabilização do fundo com argila compactada e das paredes laterais com mantas geomembranas em polietileno PEAD de 1,5 mm de espessura. A utilização da geomembrana exige uma superfície livre de depressões, o que se faz necessário a regularização do terreno.

A planta mais comumente utilizada em sistemas *Wetlands* no Brasil é o Capim Tiftom 85, mas, diversas outras espécies podem ser empregadas, desde que se adaptem as condições impostas. Tendo em vista o potencial de crescimento, a facilidade de adaptação, a resistência, a resiliência e a disponibilidade local, as espécies adotadas foram: Capim Tiftom 85, *Typha latifolia* (taboa), Araceae, *Eichmornia crassipes* (aguapé).

4.5 Eficiência esperada

A eficiência de um sistema de tratamento de efluentes depende de inúmeras variáveis relacionadas, como, o clima local, aspectos construtivos e características dos

efluentes. Segundo Von Sperling (2005), as eficiências de remoção esperadas para um sistema integrado por fossa séptica seguida de filtro anaeróbio são as descritas no quadro 11.

Quadro 11 – Eficiências de remoção esperadas para o sistema composto por fossa séptica seguida de filtro anaeróbio.

Eficiências de remoção esperadas	
DBO	80 – 85 %
DQO	70 – 80 %
Sólidos suspensos	80 – 90 %
Nitrogênio amoniacal	< 45 %
Nitrogênio total	< 60 %
Fósforo total	< 35 %

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

As eficiências de remoção esperadas de um sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical estão expostas no Quadro 12.

Quadro 12 – Eficiências de remoção esperadas para um sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical.

Eficiências de remoção esperadas	Eficiência do 1° estágio	Eficiência global (1° e 2° estágio)
DBO	>80 %	>90 %
DQO	>75 %	>85 %
Sólidos suspensos	>80 %	>90 %
Nitrogênio amoniacal	>50 %	>80 %
Nitrogênio total	<40 %	<50 %
Fósforo total	<20 %	<30 %
Coliformes termotolerantes	1 a 2 unidades log	1 a 2 unidades log

Fonte: Adaptado de Von Sperling et al (2018).

4.6 Orçamento preliminar das alternativas

As estimativas preliminares de custos foram realizadas com base na tabela de custos da Seinfra-CE, atualizada em 2023. Os Quadros 13 e 14 detalham o orçamento prévio para implantação de cada alternativa.

Quando 13 – Orçamento preliminar do sistema composto por fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios e reúso.

Alternativa 01 - Sistema composto por fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios e reúso				
Descrição	Unidade	Valor unitário (R\$)	Quantidade	Custo (R\$)
Fossas sépticas, filtros, caixas de inspeções e os reservatórios				
Alvenaria de tijolo cerâmico furado c/argamassa mista de cal hidratada, esp=20 cm	m ²	116,27	267,68	31123,15
Impermeabilização à base de argamassa polimérica e resina epoxi	m ²	55,87	368,64	20595,92
Alvenaria de elemento vazado de concreto C/arg. cimento e areia	m ²	255,85	21,78	5572,41
Tampa de ferro fundido	UN	1105,63	8	8845,04
Meio Filtrante (Filtros anaeróbios)				
Pedra britada N° 4 (50 a 76 mm)	m ³	61,33	13,1	803,42

Cont... Quando 13 – Orçamento preliminar do sistema composto por fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios e reúso.

Componentes hidráulicas				
Tubo PVC branco p/esgoto DN 100 mm	m	44,14	47	2074,58
Tubo PVC branco rígido esgoto DN 200 mm	m	129,39	5,2	672,83
Registro de gaveta bruto DN 100 mm	UN	745,95	4	2983,8
Joelho PVC branco p/esgoto DN 100 mm	UN	36,03	2	72,06
Tê PVC branco p/esgoto DN 100 mm - Juntas c/ anéis	UN	49,7	5	248,5
Tratamento preliminar				
Calha Parshall em fibra de vidro para água/esgoto W:3"	UN	1446,21	1	1446,21
Grade de retenção de sólidos em ferro chato, com barras de 10 × 40 mm com espaçamento E=20 mm	m ²	1487,73	0,004	5,95
Alvenaria de tijolo cerâmico furado c/argamassa mista de cal hidratada, esp=20 cm	m ²	116,27	0,5	58,14
Impermeabilização à base de argamassa polimérica e resina epoxi	m ²	55,87	1,5	83,81
			Total	74585,82

Fonte: Autor, 2023.

Quadro 14 – Orçamento preliminar do sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical.

Alternativa 02 - Sistema wetlands francês adaptado a climas tropicais				
Descrição	Unidade	Valor unitário (R\$)	Quantidade	Custo (R\$)
Unidades do 1º estágio (Impermeabilização e leito filtrante)				
Manta termoplástica PEAD, geomembrana lisa, 1,5 mm	m ²	45,52	24,96	1136,18
Pedra britada Nº 0 (4,8 a 9,5 mm)	m ³	108,18	4,61	498,71
Pedra britada Nº 2 (19 a 25 mm)	m ³	65,31	2,32	151,52
Pedra britada Nº 3 (25 a 50 mm)	m ³	189,89	2,32	440,54
Argila expandida	m ³	599,88	2,32	1391,72

Cont.. Quadro 14 – Orçamento preliminar do sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical.

Unidades do 2º estágio (Impermeabilização e leito filtrante)

Manta termoplastica PEAD, geomembrana lisa, 1,5 mm	m ²	45,52	21,84	994,16
Areia grossa (0,3 a 4,8 mm)	m ³	119,58	3,53	422,12
Pedra britada Nº 0 (4,8 a 9,5 mm)	m ³	108,18	1,77	191,48
Pedra britada Nº 2 (19 a 25 mm)	m ³	65,31	1,77	115,60
Argila expandida	m ³	599,88	1,77	1061,79

Caixas de registros, caixas de inspeções e caixas de acomodações das bombas

Alvenaria de tijolo cerâmico furado c/argamassa mista de cal hidratada, esp=20 cm	m ²	116,27	37,12	4315,94
Impermeabilização à base de argamassa polimérica e resina epoxi	m ²	55,87	46,72	2610,25
Tampa de ferro fundido	UN	1105,63	8	8845,04

Componentes hidráulicas

Tubo PVC branco p/esgoto DN 100 mm	m	44,14	67,4	2975,04
Joelho PVC branco p/esgoto DN 100 mm	UN	36,03	98	3530,94
Tê PVC branco p/esgoto DN 100 mm - Juntas c/ anéis	UN	49,7	3	149,10
Redução PVC branco p/esgoto DN 100 X 50 mm	UN	24,06	2	48,12
Cotovelo PVC sold. branco DN 110 mm	UN	248,55	17	4225,35
Cruzeta PVC sold. branco DN 110 mm	UN	191,01	60	11460,60
Registro de gaveta bruto DN 100 mm	UN	745,95	2	1491,90
Reservatório de polietileno de 15 m ³	UN	7199	1	7199
Bombas centrífugas modelo Schneider BC 98	UN	398,9	2	797,8

Tratamento preliminar

Calha Parshall em fibra de vidro para água/esgoto W:3"	UN	1446,21	1	1446,21
Grade de retenção de sólidos em ferro chato, com barras de 10 × 40 mm com espaçamento E=20 mm	m ²	1487,73	0,004	5,95
Alvenaria de tijolo cerâmico furado c/argamassa mista de cal hidratada, esp=20 cm	m ²	116,27	0,5	58,14
Impermeabilização à base de argamassa polimérica e resina epoxi	m ²	55,87	1,5	83,81

Total 55646,99

Fonte: Autor, 2023.

O sistema *wetlands* francês adaptado se mostrou uma alternativa economicamente mais viável, com diferenças consideráveis quando comparado com os custos preliminares da primeira alternativa.

4.7 Seleção da alternativa

Com base em uma matriz de decisão desenvolvida por Ciolletti, et al (2018), onde foi avaliado o desempenho das alternativas sugeridas em determinados critérios e atribuída pontuações para cada uns destes, constatou-se que o sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical é o mais qualificado para atender as condições do Campus de Crateús, como mostra o Quadro 15.

Quadro 15 – Matriz de decisão.

Critérios	Peso	Pontuação		Pontuação final	
		Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 01	Alternativa 02
Custo de implantação	4	1	3	4	12
Custo de operação e manutenção	5	3	3	15	15
Dificuldade técnica de manutenção e operação	4	3	3	12	12
Eficiência na remoção dos poluentes	5	3	3	15	15
Economia de água e energia	3	5	3	15	9
Possibilidade de aproveitamento final do efluente	1	5	5	5	5
Formalização acadêmica e confiabilidade das informações	3	5	5	15	15
			Total	81	83

Fonte: Autor, 2023.

5 CONCLUSÃO

As duas alternativas de tratamento de efluentes sugeridas nesse trabalho são passíveis de implantação no campus de Crateús e trariam avanços significativos no cenário atual de destinação adequada dos esgotos na qual à universidade se encontra. Além de adequar a universidade as normativas vigentes sobre tratamento de efluentes.

O sistema de fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios e reúso nas áreas verdes apesar de não ser a opção mais qualificada em questão, também apresentou bom desempenho, com eficiência esperada de até 80% para remoção de DQO e, de mais de 80% para a remoção de DBO e sólidos suspensos. Esse sistema já é bastante consolidado no Brasil e em razão disso, existe um bom acervo de informações sobre sua implantação, manutenção e operação. O projeto desse sistema não compreende o uso de energia elétrica, um ponto superior em relação a segunda alternativa.

As duas opções de tratamento de efluentes abordadas buscam aproveitar o potencial existente nos esgotos, garantindo uma destinação final sustentável, que além de enriquecer as áreas verdes com nutrientes, melhorar a estética paisagística do Campus, reduz a quantidade de água potável utilizada com irrigação. Essa primeira alternativa apresentou uma estimativa de custo preliminar de implementação de R\$, 74.588,82 sendo um valor considerável.

O sistema *wetlands* francês adaptado ao clima subtropical foi a alternativa que se sobressaiu na análise crítica desse estudo. A eficiência de remoção esperada para essa tecnologia de tratamento supera 85% para a remoção DQO e mais de 90% na remoção de DBO e sólidos suspensos. Essa alternativa não é tão consolidada no Brasil como a primeira, mesmo assim, existem boas referências acadêmicas e informações confiáveis sobre a implantação, operação e manutenção desse sistema.

Uma desvantagem do sistema *wetlands* em relação ao anterior, é o uso de energia elétrica para alimentação dos módulos por bateladas. Por outro lado, o sistema *wetlands* necessita de menores áreas para sua implantação. A estimativa preliminar de custo de implantação dessa alternativa foi de R\$.55.646, 99

O sistema *wetlands* francês foi escolhido como alternativa mais viável devido seu menor custo de implantação, necessidade de menores áreas de projeto e maiores eficiências esperadas de remoção. Contudo, esse trabalho ainda apresenta uma série de limitações, tendo em vista que os orçamentos contam apenas com custos preliminares de implantação e não considera gastos com energia elétrica ou para adquirir as plantas utilizadas nos *wetlands*.

Também não foram definidas áreas específicas do campus para implantação do projeto, o que pode encarecer os custos com as tubulações utilizadas para a irrigação.

REFERÊNCIAS

AQUINO, Sérgio F. de; CHERNICHARO, Carlos AL. **Acúmulo de ácidos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse:** causas e estratégias de controle. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, p. 152-161, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13969 – **Tanques Sépticos** – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9649 – **Projeto de Redes Coletoras de Esgoto Sanitário.** Rio de Janeiro, 1986.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). NBR 7.229: **Projeto, Construção e Operação de Sistemas de Tanques Sépticos,** Rio de Janeiro, 15p.

ÁVILA, Renata O. **Avaliação do desempenho de sistemas tanque séptico-filtro anaeróbio com diferentes tipos de meio suporte.** Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, programa de pós-graduação de engenharia–Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

BACKES, Francisco José. **Avaliação da eficiência de um sistema fossa séptica e filtro anaeróbio em escala piloto para o tratamento de efluente sanitário com a adição de papel higiênico como fonte de matéria orgânica.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso.

BENTO, Alessandra Pellizzaro et al. **Tratamento de esgoto doméstico em lagoas de estabilização com suportes para o desenvolvimento de perifiton-biofilme.** 2005.

BEZERRA, Francisco Mailson Mourão et al. **Estimativa do consumo de água para a irrigação no campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará.** 2020.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil:** promulgada em 5 de outubro de 1988.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos:** NBR 7229/97. Rio de Janeiro, set. 1997. 15p.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos** – Projeto, construção e operação: NBR 13969. Rio de Janeiro, set. 1997. 58p.

BRASIL. Lei nº. 11.445, de 05 de janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o Saneamento básico;** altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de

maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei Nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº. 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico, e dá outras providências.**

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 3. Ed. ver. – Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.

BRASIL, Mozart da Silva; MATOS, Antonio Teixeira de; SOARES, Antônio Alves. **Plantio e desempenho fenológico da taboa (*Thypha* sp.)** utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 12, p. 266-272, 2007.

CEARÁ. Lei Complementar nº 162, de 20 de junho de 2016. **Institui a Política Estadual de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário no Estado do Ceará**, institui o Sistema Estadual de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário, o Sistema Estadual de Informações em Saneamento, e cria o Fundo Estadual de Saneamento.

CEARÁ. Lei n. 16.033, de 20 de junho de 2016. **Dispõe sobre a política de reúso de água não potável no âmbito do Estado do Ceará.**

CEARÁ. Resolução nº. 02 do Conselho Estadual Do Meio Ambiente (COEMA), 02 de fevereiro de 2017. **Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras.**

CIOLETTI JUNIOR, Edmar e CARMO, Augusto Beloto do e LEITE, Natália Cancela Moreira. **Saneamento básico rural**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – EPUSP, São Paulo, 2018.

CIVIL, Casa et al. **Lei nº 11.445**, de 5 de janeiro de 2007.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução No. 430, de 13 de maio de 2011; **Dispõe sobre as Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes**, Complementa e Altera a Resolução No. 357, de 17 de Março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Diário Oficial [da] União, n. 92, p. 89-89, 2011.

CORDI, Livia et al. **Intumescimento filamentosos no processo de lodos ativados aplicado ao tratamento de soro de queijo**: caracterização e uso de floculantes para melhorar a sedimentabilidade. 2007.

CRATEÚS. Plano Municipal de Saneamento Básico: **Abastecimento de água e esgotamento Sanitário**, Crateús/CE.Crateús, 2015.

DA SILVA, Marcos Erick Rodrigues; DE AQUINO, Marisete Dantas; DOS SANTOS, André Bezerra. **Pós-tratamento de efluentes provenientes de reatores anaeróbios tratando esgotos sanitários por coagulantes naturais e não-naturais**. Revista Tecnologia, v. 28, n. 2, 2007.

DE SOUZA, Eng Marcos Eduardo. **Uso do reator Uasb para tratamento de esgoto sanitário** (“). 1986.

Diário Oficial da União, Brasília. Brasil. (2020). **Lei 14026**, de 15 de julho de 2020.

ESTEVES, F.; AMADO, A. M. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência. 1998.

GEHLING, Gino. **Lagoas de estabilização**. Porto Alegre: UFRGS, 2017.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa-3**. Ed-São Paulo. SP: Atlas, Mercuryo, 1996.

HESPANHOL, Ivanildo et al. **Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 4, p. 75-95, 2002.

IAQUELI, André Luiz. **Wetlands Construídos: Aplicações, benefícios e vantagens do sistema**. 2016.

IPECE. O Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal**, 2017, Crateús.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. Cetesb, 1975.

LEONETI, Alexandre Bevilacqua; PRADO, Eliana Leão do; OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. **Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI**. Revista de administração pública, v. 45, p. 331-348, 2011.

MAGALHÃES FILHO, Fernando Jorge Corrêa. **Aspectos hidráulicos e hidrológicos de um sistema combinado de evapotranspiração e wetlands**. 2013.

MARTINS, Maria Zilda Chaves. **Caracterização geotécnica do solo do campo experimental da Universidade Federal do Ceará-Campus Crateús**. 2022.

MONTEIRO, Rodrigo Cesar de Moraes. **Viabilidade técnica do emprego de sistemas tipo wetlands para tratamento de água cinza visando o reúso não potável**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIJNYK, Débora Parcias et al. **Avaliação da nitrificação e desnitrificação de esgoto doméstico empregando filtros plantados com macrófitas (wetlands) de fluxos vertical e horizontal: sistemas híbridos**. 2008.

PELLISSARI, Catiane et al. **Tratamento de efluente proveniente da bovinocultura de leite empregando Wetlands construídos de escoamento subsuperficial**. 2013.

PEREIRA, Erlon Lopes; CAMPOS, Cláudio Milton Montenegro; MOTERANI, Fabrício. **Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiota de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando efluentes de suinocultura**. *Ambiente & Água-Na Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 4, n. 3, p. 157-168, 2009.

PERÍGOLO, RENATA ALVES. **Avaliação do Emprego de Lagoas de Estabilização em Escala Piloto para Pesquisa de Tratamento de Esgoto Doméstico**. 2004. Tese de Doutorado. Dissertação. UNB.[Distrito Federal] 2004.

RODRIGUES, Eduardo Bello et al. **Utilização do biocarvão como meio filtrante de wetland construído vertical empregado no tratamento de esgoto sanitário**. 2021.

SALATI, Eneas. **Controle de qualidade de água através de sistemas de wetlands construídos**. *Fundação Brasileira para o desenvolvimento sustentável*, Rio de Janeiro, p. 19, 2001.

SALES, Hian Melo; BATISTA, Tatiane Lima. **Aproveitamento de águas pluviais no semiárido cearense: estudo de caso na Universidade Federal do Ceará em Crateús**. 2020.

SEZERINO, Pablo Heleno et al. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. 2006.

SILVA FILHO, Geraldo Inácio. **Tratamento de esgoto utilizando a ecotecnologia Wetlands Construídos para sistemas coletivos de pequeno porte**. 2022.

SILVA, Luan Sales. **Análise de uma plataforma de monitoramento de condições climáticas com o intuito de fomentar dados visando o desenvolvimento do discente da UFC-Campus Crateús**. 2022.

SILVA, Maria Fernanda Rodrigues da; FRANCA, Raimunda Moreira da. **Levantamento florístico do campus da UFC de Crateús**. 2020.

SILVA, Renata. **Modalidades e etapas da pesquisa e do trabalho científico**. São José: USJ, 2008 (mimeo)._____; URBANESKI, Vilmar. Metodologia do trabalho científico. Indaial: UNIASSELVI, 2009.

SILVA, Selma Cristina da. “ **Wetlands construídos” de fluxo vertical com meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgotos domésticos**. 2007.

SOBRINHO, Pedro Alem; JORDÃO, Eduardo Pacheco. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios—uma análise crítica**. CHERNICHARO, CAL (coordenador) Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, p. 491-513, 2001.

VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

VON SPERLING, Marcos; SEZERINO, Pablo H. **Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil**. DOCUMENTO DE CONSENSO ENTRE PESQUISADORES E PRATICANTES. Boletim Wetlands Brasil, p. 65, 2018.

ZANELLA, Luciano. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: Wetlands-construídos utilizando brita e bambu como suporte**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2008.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO

1 - Dimensionamento do tratamento preliminar:

- Gradeamento

- Eficiência da grade:

$$E = \frac{a}{t + a}$$

$$E = \frac{20}{10 + 20}$$

$$E = 67\%$$

- Área útil:

$$Au = \frac{Q_{\text{máx}}}{V}$$

$$Au = \frac{0,0025}{0,6}$$

$$Au = 0,004 \text{ m}^2$$

- Seção junto à grade:

$$S = \frac{Au}{E}$$

$$S = \frac{0,004}{0,67}$$

$$S = 0,006 \text{ m}^2$$

- Largura do canal:

$$L = \frac{S}{hm_{\text{máx}}}$$

$$L = \frac{0,006}{0,6}$$

$$L = 0,1 \text{ m}$$

- Número de barras:

$$Nb = \frac{L - a}{t + a}$$

$$Nb = \frac{104 - 20}{10 + 20}$$

$$Nb = 3 \text{ barras}$$

- Desarenador

- Área superficial:

$$A = \frac{Q_{\text{máx}}}{V_s}$$

$$A = \frac{0,0025}{0,6}$$

$$A = 0,12 \text{ m}^2$$

- Comprimento com 50% de folga:

$$L' = 1,5 \times \left(\frac{Q_{\text{máx}}}{b \times V_s} \right)$$

$$L' = 1,5 \times \frac{0,0025}{0,6 \times 0,021}$$

$$L' = 0,3 \text{ m}$$

- Profundidade:

$$h = V_s \times \left(\frac{L'}{Vh} \right)$$

$$h = 0,021 \times \left(\frac{0,3}{0,3} \right)$$

$$h = 0,02 \text{ m}$$

- Tempo de sedimentação:

$$t = \frac{h}{V_s}$$

$$t = \frac{0,02}{0,021}$$

$$t = 0,66 \text{ s}$$

- Altura do depósito de areia:

$$h' = 0,1 \times h$$

$$h' = 0,1 \times 0,02$$

$$h' = 0,002 \text{ m}$$

2 - Dimensionamento da fossa séptica:

- Volume útil (V):

$$V = 1000 + N \times (C \times T + K \times Lf)$$

$$V = 1000 + 3000 \times (50 \times 0,5 + 97 \times 0,2)$$

$$V = 134.200 \text{ L} *$$

* Como foram adotadas duas fossas sépticas, o volume utilizado nas próximas etapas do dimensionamento equivale à metade deste.

- Área útil:

$$A = \frac{V}{h}$$

$$A = \frac{67}{2,8}$$

$$A = 24 \text{ m}^2$$

- Largura interna:

$$L = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)}$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{24}{2}\right)}$$

$$L = 3,5 \text{ m}$$

- Comprimento:

$$C = 2 * L$$

$$C = 2 \times 3,5$$

$$C = 7 \text{ m}$$

3 – Dimensionamento do filtro anaeróbio

- Volume útil:

$$V = 1,6 \times N \times C \times T$$

$$V = 1,6 \times 3000 \times 50 \times 0,5$$

$$V = 120.000 \text{ L} *$$

*Como foram adotadas dois filtros anaeróbios no sistema, o volume utilizado nas próximas etapas do dimensionamento equivale à metade deste.

- Área útil:

$$A = \frac{V}{h}$$

$$A = \frac{60}{2,8}$$

$$A = 21,4 \text{ m}^2$$

- Largura:

$$L = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)}$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{21,4}{2}\right)}$$

$$L = 3,3 \text{ m}$$

- Comprimento:

$$C = 2 \times L$$

$$C = 2 \times 3,3$$

$$C = 6,6 \text{ m}$$

4 – Dimensionamento dos módulos *wetlands* francês

- 1º estágio

- Carga de DBO do esgoto bruto:

$$CDBO = Q_{méd} \times ConDBO$$

$$CDBO = 2 \times 418$$

$$CDBO = 836 \frac{g}{dia}$$

- Área requerida:

$$Ar = \frac{CDBO}{T_{aos}}$$

$$Ar = \frac{836}{150}$$

$$Ar = 5,57 \text{ m}^2$$

- Taxa de aplicação hidráulica superficial:

$$T_{ahs} = \frac{Q_{méd}}{Ar}$$

$$T_{ahs} = \frac{2}{5,57}$$

$$T_{ahs} = 0,359 \frac{m^3}{m^2 \cdot d}$$

- Dimensões :

$$C = \sqrt{Ar}$$

$$C = \sqrt{5,57}$$

$$C = 2,4 \text{ m}$$

$$L = C = 2,4 \text{ m}$$

- 2º estágio

- Carga de DBO afluente:

$$CDBO_a = CDBO \times \left(1 - \frac{efi}{100}\right)$$

$$CDBO_a = 836 \times \left(1 - \frac{90}{100}\right)$$

$$CDBO_a = 83,6 \frac{g}{d}$$

- Área requerida:

$$Ar = \frac{CDBO_a}{Taos}$$

$$Ar = \frac{83,6}{20}$$

$$Ar = 4,2 \text{ m}^2$$

- Taxa de aplicação hidráulica superficial:

$$Tahs = \frac{Q_{méd}}{Ar}$$

$$Tahs = \frac{2}{4,2}$$

$$Tahs = 0,478 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot d}$$

- Dimensões:

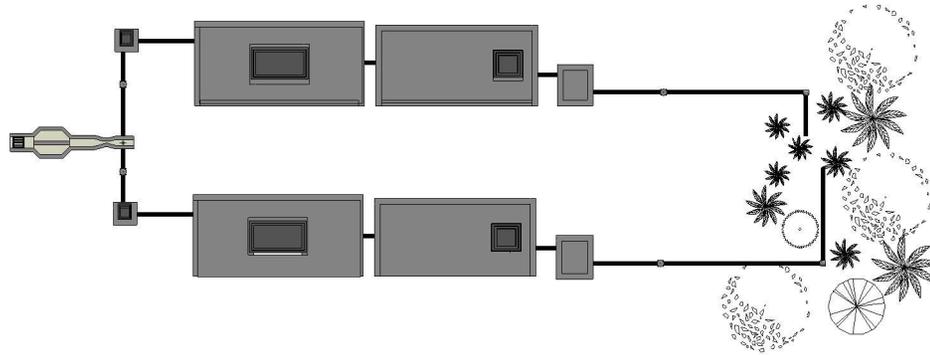
$$C = \sqrt{Ar}$$

$$C = \sqrt{4,2}$$

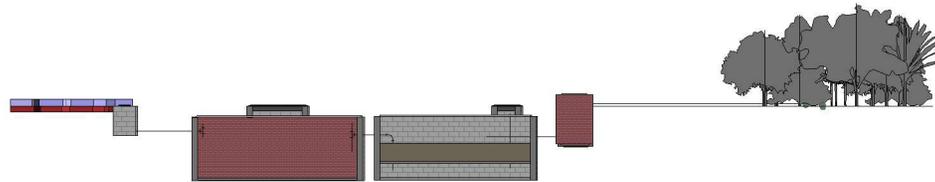
$$C = 2,1 \text{ m}$$

$$L = C = 2,1 \text{ m}$$

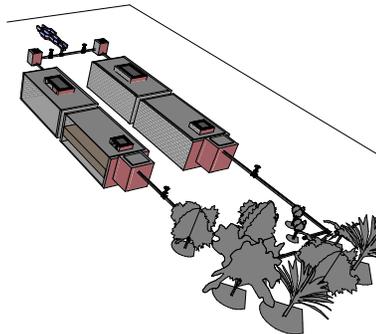
APÊNDICE B – VISTA DO TERRENO, LATERAL E 3D DO SISTEMA FORMADO POR FOSSA SÉPTICA SEGUIDA DE FILTRO ANAERÓBIO E REÚSO.



1 Terreno
1 : 100



2 Vista lateral
1 : 100

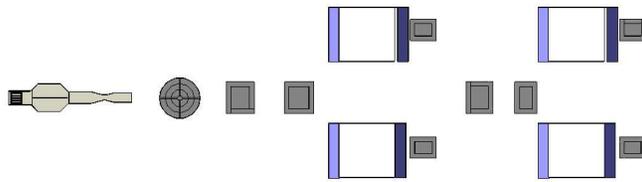


3 3d

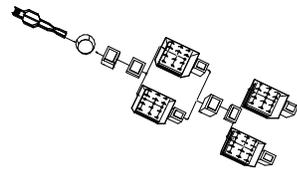
Sistema composto por duas fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios e reúso na irrigação das áreas verdes.

Número do projeto	0001
Data	06/12/2023
Desenhadas por	Luis Deivid Paulino de Aragão.
A101	
Escala	1 : 100

APÊNDICE C – VISTA DO TERRENO E 3D DO SISTEMA WETLANDS FRANCÊS



1 Terreno
1 : 100



2 Vista 3D



3 3d

wetlands francês	
Número do projeto	0001
Data	06/12/2023
Desenhadas por	Luis Deivid Paulino de Aragão
A101	
Escala	1 : 100